

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Tomislav Sabolić

Zagreb, 2008.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada:

Doc. Dr. sc. Krešimir Grilec

Tomislav Sabolić

Zagreb, 2008.

Izjava

Izjavljujem da sam završni rad na temu „Otpornost na eroziju česticama izotermički poboljšanog nodularnog lijeva“ izradio samostalno koristeći navedenu stručnu literaturu i znanje stečeno tijekom studija.

Stručnu pomoć u odabiru literature, definiranju postupaka te korisnim savjetima prilikom izrade svesrdno mi je pružio mentor doc. dr. sc. Krešimir Grilec.

Tomislav Sabolić

SADRŽAJ

SAŽETAK

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

POPIS OZNAKA

1. UVOD	1
2. EROZIJA.....	2
2.1. EROZIJA ČESTICAMA.....	3
2.2. TEORIJSKI MODEL EROZIJE ČESTICAMA	7
2.3. PLAN PROVOĐENJA ISPITIVANJA OTPORNOSTI NA EROZIJSKO TROŠENJE	15
2.3.1. MODEL EROZIJE POVRŠINE	15
2.3.2. DEFINIRANJE ELEMENATA TRIBOSUSTAVA	17
2.3.3. ERODIRANI MATERIJAL.....	17
2.3.4. ABRAZIV	20
2.3.5. KUT UPADA ABRAZIVA	20
2.3.6. PARAMETRI ISPITIVANJA	20
3. NODULARNI LIJEV	23
3.1. DOBIVANJE NODULARNOG LIJEVA.....	23
3.2. TOPLINSKA OBRADA NODULARNOG LIJEVA	25
3.2.1. ŽARENJE ZA REDUKCIJU NAPETOSTI	25
3.2.2. GRAFITIZACIJSKO ŽARENJE ZA ELIMINACIJU SLOBODNOG CEMENTITA.....	25
3.2.3. GRAFITIZACIJSKO ŽARENJE ZA POSTIZANJE FERITNE STRUKTURE ..	25
3.2.4. NORMALIZACIJA	26
3.2.5. POBOLJŠAVANJE NODULARNOG LIJEVA.....	26
3.2.6. POVRŠINSKO KALJENJE.....	26
3.3. IZOTERMIČKI POBOLJŠANI NODULARNI LIJEV	27
3.3.1. OPIS POSTUPKA IZOTERMIČKOG POBOLJŠAVANJA	28

3.3.2. SVOJSTVA IZOTERMIČKI POBOLJŠANOG NODULARNOG LIJEVA.....	31
3.3.3. PRIMJENA IZOTERMIČKI POBOLJŠANOG NODULARNOG LIJEVA	36
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	37
4.1. KEMIJSKA ANALIZA UZORAKA.....	38
4.2. METALOGRAFSKO ISPITIVANJE UZORAKA	40
4.2.1. PRIPREMA METALOGRAFSKIG UZORKA.....	41
4.3. ISPITIVANJE TVRDOĆE UZORAKA	45
4.4. ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA EROZIJSKO TROŠENJE.....	48
4.4.1. PARAMETRI ISPITIVANJA.....	50
4.4.2. REZULTATI ISPITIVANJA	51
4.4.3. ANALIZA UZORAKA SKENING ELEKTRONSKIM MIKROSKOPOM.....	56
4.5. STATISTIČKA OBRADA REZULTATA.....	60
4.5.1. RAZVOJ MODELA	60
5. ZAKLJUČAK	70
6. POPIS LITERATURE	71

POPIS SLIKA

Slika 1 - Erozijska krutim česticama na rotoru turbine, primjer.....	3
Slika 2 – Procesi trošenja erozijom česticama.....	5
Slika 3 – Jedinični sudar krute čestice s trošenom površinom.....	7
Slika 4 – Utjecaj veličine krutih čestica na erozijsko trošenje	8
Slika 5 – Utjecaj kuta sudara na erozijsko trošenje krutim česticama.....	9
Slika 6 – Utjecaj brzine gibanja na erozijsko trošenje krutim česticama	10
Slika 7 – Ovisnost brzine erozije o temperaturi za neke materijale.....	12
Slika 8 – Ovisnost brzine erozije o temperaturi za neke materijale pri različitim kutovima udara	13
Slika 9 – Utjecaj oblika abrazivne čestice na brzinu erozije.....	14
Slika 10 – Model udara krute čestice u površinu materijala	15
Slika 11 – Shematski prikaz tribosustava kod erozije česticama	17
Slika 12 – Izotermičko poboljšavanje nodularnog lijeva.....	18
Slika 13 – Razlika u mehaničkim svojstvima između klasičnog nodularnog lijeva i izotermički poboljšanog nodularnog lijeva	19
Slika 14 – Kut upada abraziva	20
Slika 15 – Shema uređaja za ispitivanje erozijskog trošenja	21
Slika 16 – Nodularni lijev	23
Slika 17 – Grafitizacijsko žarenje za postizanje feritne strukture	25
Slika 18 – Poboljšavanje nodularnog lijeva.....	26
Slika 19 – Izotermički poboljšani nodularni lijev.....	27
Slika 20 – Shematski prikaz postupka izotermičkog poboljšavanja nodularnog lijeva:	28
(a) – dijagram postupka; (b) – izotermički TTT dijagram	28
Slika 21 – Shematski prikaz izotermičke pretvorbe austenita nodularnog lijeva na: višoj (a) i nižoj (b) temperaturi izotermičke pretvorbe	30
Slika 22 – Utjecaj temperature izotermičke pretvorbe na mehanička svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva	32
Slika 23 – Usporedba vlačne čvrstoće i istezljivosti za normirane i izotermički poboljšane nodularne lijevove	33

Slika 24 – Usporedba lomne žilavosti normiranih i izotermički poboljšanih nodularnih lijevova.....	33
Slika 25 – Savojna dinamička izdržljivost korijena zuba zupčanika izrađenih od različitih materijala i različito toplinski obrađenih	34
Slika 26 – Gubitak mase nekoliko različitih izotermički poboljšanih nodularnih lijevova i abrazijski otpornih čelika.....	35
Slika 27 – Usporedba toplinske obrade, tj. potrošnje energije, prilikom proizvodnje zupčanika izotermičkim poboljšavanjem i klasičnim	36
poboljšavanjem ili cementiranjem.....	36
Slika 28 – Spectumat - 750 GDS Leco	39
Slika 29 – Mikrostruktura uzorka u poliranom stanju, povećanje 50x	42
Slika 30 – Mikrostruktura uzorka u poliranom stanju, povećanje 100x	42
Slika 31 – Mikrostruktura uzorka u nagriženom stanju, povećanje 100x	43
Slika 32 – Mikrostruktura uzorka u nagriženom stanju, povećanje 200x	43
Slika 33 – Mikrostruktura uzorka u nagriženom stanju pri polariziranom svjetlu, povećanje 500x	44
Slika 34 – Shematski prikaz mjerenja tvrdoće po HRC i HRB metodi	45
Slika 35 – Uređaj za ispitivanje otpornosti na eroziju.....	48
Slika 36 – Shema uređaja za ispitivanje otpornosti na eroziju	49
Slika 37 – Unutrašnjost uređaja za ispitivanje otpornosti na eroziju	50
Slika 38 – Vaga METLLER B5C 1000	51
Slika 39 – Histogram gubitka mase ovisno o kutu upada abraziva (kvarcnog pjeska)	52
Slika 40 – Histogram gubitka mase ovisno o kutu upada abraziva (sitne sačme)	53
Slika 41 – Histogram gubitka mase ovisno o kutu upada abraziva (krupne sačme) .	55
Slika 42 – Princip rada skenirajućeg elektronskog mikroskopa	56
Slika 43 – Skenirajući elektronski mikroskop Oxford Tescan	57
Slika 44 – Fotografija uzorka u poliranom stanju, povećanje 708x	58
Slika 45 – Fotografija uzorka ispitivanog na otpornost erozijskom trošenju,.....	59
povećanje 859x	59
Slika 46 – Histogram za uzorke ispitivane pod kutom upada abraziva od 90°	61
Slika 47 – Histogram za uzorke ispitivane pod kutom upada abraziva od 75°	61
Slika 48 – Histogram za uzorke ispitivane pod kutom upada abraziva od 60°	62
Slika 49 – Histogram za uzorke ispitivane pod kutom upada abraziva od 45°	63

Slika 50 – Histogram za uzorke ispitivane pod kutom upada abraziva od 30°	63
Slika 51 – Histogram za uzorke ispitivane pod kutom upada abraziva od 15°	64
Slika 52 – Box whisker plot gubitaka mase s obzirom na kut upada abraziva	68
Slika 53 – Box whisker plot gubitaka mase s obzirom na vrstu abraziva	69

POPIS TABLICA

Tablica I – Podjela slučajeva trošenja	4
Tablica II – Mehanička svojstva nodularnog lijeva	24
Tablica III – Analiza kemijskog sastava uzorka izotermički poboljšanog nodularnog lijeva	38
Tablica IV – Tvrdća uzoraka	47
Tablica V – Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva (kvarcnog pjeska)	52
Tablica VI – Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva (sitne sačme)	53
Tablica VII – Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva (krupne sačme)	54
Tablica VIII – Osnovni statistički podaci za ispitivanje erozije pod kutom od 90°	60
Tablica IX – Osnovni statistički podaci za ispitivanje erozije pod kutom od 75°	61
Tablica X – Osnovni statistički podaci za ispitivanje erozije pod kutom od 60°	62
Tablica XI – Osnovni statistički podaci za ispitivanje erozije pod kutom od 45°	62
Tablica XII – Osnovni statistički podaci za ispitivanje erozije pod kutom od 30°	63
Tablica XIII – Osnovni statistički podaci za ispitivanje erozije pod kutom od 15°	64
Tablica XIV – Podaci gubitka mase, kuta upada i vrste abraziva	65
Tablica XV – Intervali povjerenja za gubitak mase s obzirom na kut upada abraziva	66
Tablica XVI – intervali povjerenja za gubitak mase s obzirom na vrstu abraziva	67
Tablica XVII – Analiza varijance gubitka mase u odnosu na kut upada abraziva i vrstu abraziva	67

POPIS OZNAKA

<u>Oznaka</u>	<u>Značenje</u>	<u>Mjerna jedinica</u>
HRC	Tvrdoća po Rockwelu	HRC
KU	Lomna žilavost	J
F	Sila	N
R_m	Vlačna čvrstoća	N/mm ²
$Rp_{0,2}$	Granica razvlačenja	N/mm ²
ϑ_{iz}	Temperatura izotermičke pretvorbe	°C
V		
v_u	Brzina upada čestica	m/s
HV	Tvrdoća po Vickersu	HV
α_u	Kut upada abraziva	°
V	Volumen	m ³
m	Masa	kg
p	Pritisak	Pa
D	Promjer	m
ρ	gustoća	kg/ m ³
$v_{\check{c}}$	Brzina čestice abraziva	m/s
ϑ	Temperatura	°C
t	Vrijeme	min
K_{Ic}	Lomna žilavost	N/mm ^{3/2}
HRB	Tvrdoća po Brinellu	HRB
n_{okr}	Broj okretaja osovine	

SAŽETAK

Rad je podjeljen na dva dijela, teorijski i eksperimentalni. U teorijskom dijelu opisan je mehanizam erozije česticama te je ukratko opisan izotermički poboljšani nodularni lijev. Opisana je njegova proizvodnja, svojstva, prednosti i nedostaci te područja primjene. $N/mm^{3/2}$

U eksperimentalnom dijelu izvršena su ispitivanja erozijske otpornosti uzoraka od izotermički poboljšanog nodularnog lijeva pomoću tri vrste erozivnih čestica: kvarcnog pjeska i čelične sačme od 700 μm i 1100 μm , varirani su i kutovi upada erozijskih čestica i to: 15°, 30°, 45°, 60°, 75° i 90°.

Dobiveni rezultati su statistički obrađeni i donesen je zaključak pod kojim uvjetima erozijskog trošenja česticama izotermički poboljšani nodularni lijev pokazuje najbolju, odnosno najlošiju otpornost.

1. UVOD

Danas je ispitivanje materijala prije upotrebe normalan postupak koji se provodi vrlo često prilikom određivanja svojstava nekog materijala, te se nakon toga određuje je li taj materijal primjenjiv za upotrebu za koju je bio predviđen. Ispitivanje koje se provodi mora biti dobro izvedeno da bi dobiveni rezultati bili točni i kasnije primjenjivi u praksi.

Trošenje materijala zbog erozije česticama je danas vrlo česta pojava te je svrha ovog istraživanja ispitivanje otpornosti izotermički poboljšanog nodularnog lijeva na erozijsko trošenje ovisno o kutu upada i vrsti abraziva. tj. čestica trošenja. Nakon završetka ispitivanja analizirat će se dobiveni rezultati i na temelju tih rezultata donijeti zaključak o svojstvima izotermički poboljšanog nodularnog lijeva.

Ispitivanje će se provoditi na uređaju za ispitivanje otpornosti materijala na eroziju. Bit će izvedeno tako da će abraziv padati pod različitim kutevima na uzorak od izotermički poboljšanog nodularnog lijeva pod utjecajem gravitacije, prilikom čega će bit praćen gubitak mase uslijed trošenja. Mehanizam trošenja bit će erozija krutim česticama. Dobiveni rezultati će se analizirati te će se nakon toga dati zaključak.

2. EROZIJA

Premda postoji vrlo velik broj slučajeva trošenja, većina autora suglasna je da postoje četiri osnovna mehanizma trošenja, a to su:

- abrazija
- adhezija
- umor površine
- tribokorozija

Najčešći mehanizam koji se javlja je abrazijsko trošenje. U mnogo slučajeva površina materijala se troši česticama koje se nalaze u struji fluida. Ovaj tip trošenja najčešće se naziva erozija. Ona izaziva najveće probleme kod industrije za preradu nafte i kod turbina. Erozija ima i korisne aplikacije, kao npr, kod pjeskarenja ili erozivnog bušenja tvrdih materijala. Proučavanje erozije kao pojave se može podijeliti na dva glavna dijela. Prvi se sastoji u određivanju broja, smjera i brzine čestica erozije, dok se drugi sastoji od izračunavanja količine potrošenog materijala.

Mehanizam trošenja materijala nije isti za sve tipove materijala, stoga će se erozija promatrati kao erozija krhkih i erozija duktilnih materijala, duktilni materijali pokazuju gubitak mase uslijed plastične deformacije površine, tj. mikroumorom. Kod krhkih materijala trošenje nastaje uslijed nastanka i propagacija mikropukotina na površini materijala, tj. mehanizmom mikronaprsnuća.

2.1. EROZIJA ČESTICAMA

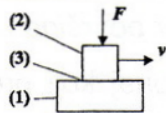
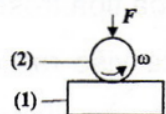
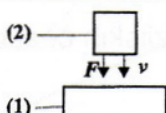
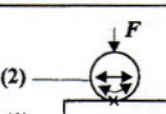
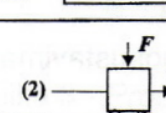
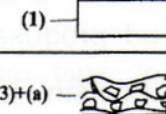
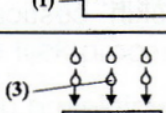
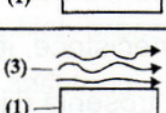
Predmet ovog istraživanja je otpornost na eroziju izotermički poboljšanog nodularnog lijeva, a karakteriziraju ga procesi razaranja trošene površine u dodiru s različitim slobodnim česticama koje se tijekom zbivanja slučaja relativno gibaju u odnosu na trošenu površinu.

Budući da je riječ o postojećem realnom tribosustavu, u procjenjivanju stupnja opasnosti od pojedinih mehanizama trošenja moguće je primijeniti jednu od podjela mehanizama trošenja, prikazanih u tablici I.



Slika 1 - Erozija krutim česticama na rotoru turbine, primjer, [1]

Tablica I – Podjela slučajeva trošenja, [2]

	TIP TROŠENJA	HEMA TRIBOSUSTAVA ¹⁾	RELATIVNO GIBANJE	MEHANIZMI TROŠENJA ²⁾ / STUPANJ OPASNOSTI ³⁾				POKAZATELJ OTPORNOSTI NA TROŠENJE
				AB	AD	UP	TK	
1.	SKLIZNO		sklizanje	4	1	3	5	Kompatibilnost materijala
2.	KOTRLJAJUĆE		kotrljanje	4	4	1	5	Dinamička izdržljivost površine
3.	UDARNO		udarci	3	3	1	5	
4.	IZJEDANJE (fretting)		vibracije				1	Konstruktivske mjere
5.	ABRAZIJA		sklizanje	1		4	5	Udio i mikrotvrdoća tvrde faze
6.	EROZIJA ČESTICAMA		strujanje	1		2	5	Udio i mikrotvrdoća tvrde faze/dinamička izdržljivost površine
7.	EROZIJA KAPLJEVINOM		strujanje			1	4	Dinamička izdržljivost površine
8.	KAVITACIJA		strujanje			1	4	

Oznake u tablici I predstavljaju:

(1) – funkcionalni dio

(2) – funkcionalni dio

(3) – međusredstvo

(a) – abraziv

AB – abrazija

AD – adhezija

UP – umor površine

TK – tribokorozija

1 – jako visoki

2 – visoki

3 – srednji

4 – niski

5 – najniži

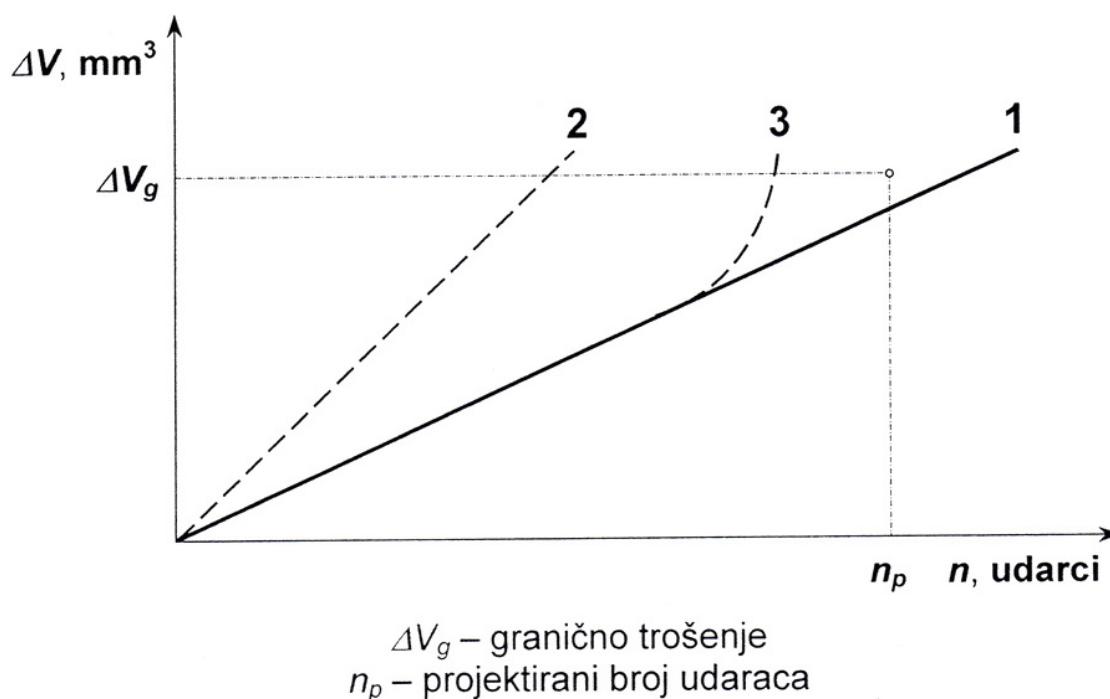
Gotovo svi realni tribosustavi mogu se svrstati u jednu od navedenih vrsta iz tablice I, što uvelike olakšava predviđanje stupnja opasnosti od pojedinih mehanizama trošenja, a samim time poduzimanje preventivnih triboloških mjera s ciljem smanjivanja iste opasnosti.

Kod erozije česticama vidimo da je dominantni mehanizam trošenja abrazija, dok značajnu ulogu u samom mehanizmu trošenja igra i umor površine, a utjecaj tribokorozije je zanemariv.

Erozija česticama je gubitak materijala s površine krutog tijela zbog relativnog gibanja (strujanja) fluida u kojem se nalaze krute čestice [2].

Čestice iz plinovitog ili tekućeg fluida mogu na površinu djelovati klizno ili udarno, ovisno o parametrima relativnog gibanja i kontakta, naročito brzine gibanja čestica i kuta sudara s trošenom površinom.

Procese trošenja erozijom česticama grafički predočuje dijagram na slici 2.



Slika 2 – Procesi trošenja erozijom česticama, [2]

Pravac 1 prikazuje tijek normalnog procesa trošenja dijelova tribosustava erozijom česticama, bilo da se radi o mehanizmu abrazije bilo o umoru površine.

Pravac 2 prikazuje tijek procesa trošenja erozijom česticama u slučaju kada je mehanizam abrazije intenzivniji od predviđenog.

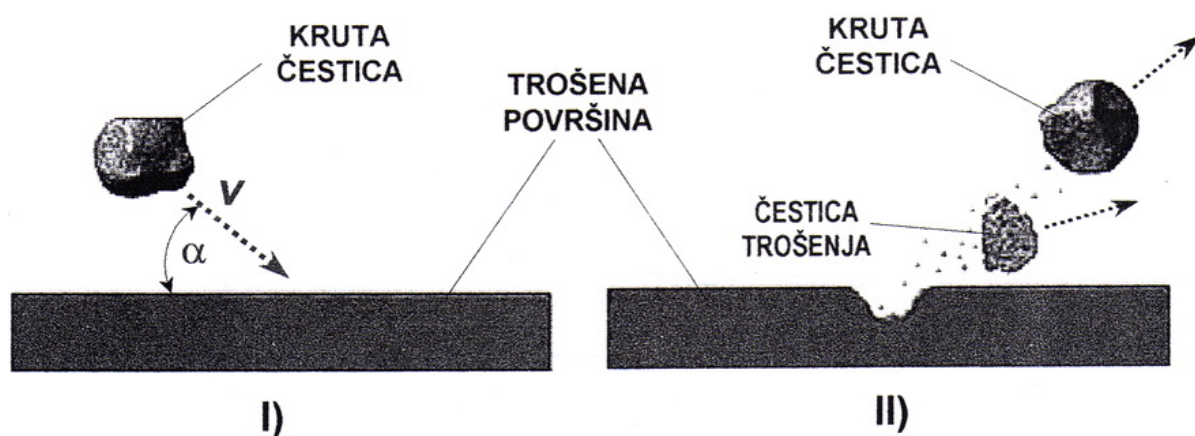
Pravac 3 prikazuje tijek procesa trošenja erozijom česticama u slučaju preranog umora površine.

2.2. TEORIJSKI MODEL EROZIJE ČESTICAMA

Budući da je osim mehanizma abrazije u procesima erozije česticama značajan i mehanizam umora površine, njihovi učinci i utjecaji različitih čimbenika opisuju se na razini jediničnog sudara čestice s trošenom površinom, prikazanog na slici 3:

Jedinični sudar sastoji se od dvije faze:

- I. „Upad“ krute čestice određenom brzinom gibanja i pod određenim kutom, te njezin trenutni sudar s trošenom površinom materijala;
- II. Odbijanje krute čestice od trošene površine uz prateće razaranje površine otkidanjem djelića materijala u obliku čestice trošenja.



Slika 3 – Jedinični sudar krute čestice s trošenom površinom, [3]

Iz područja erozije česticama provedena su brojna istraživanja, koja su ukazala na određene specifičnosti, ali i sličnosti s abrazijskim trošenjem:

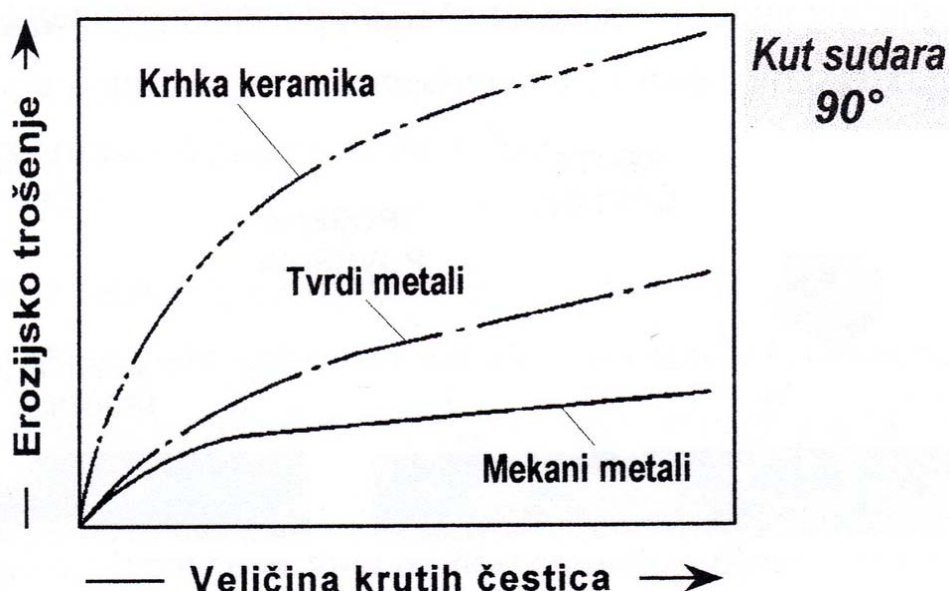
Finnie [4] je zaključio da se erozija česticama kod duktilnih materijala odvija mehanizmom rezanja, a kod krhkih materijala naprsnućima („cracking“).

Bitter [5] je eroziju česticama definirao kao kombinirani proces ponovljenih deformacija i rezanja materijala. Proces rezanja je opisao kao udaranje materijala po krutoj površini pod oštrim kutom i grebanje materijala s iste.

Na značaj svojstava krutih čestica, naročito veličine i oblika, ukazali su Uetz i Föhl [6], te Winter i Hutchings [7] utvrdivši da krupnije i oštrije čestice uzrokuju jače

erozijsko trošenje. No, porast krupnoće čestice jače se odražava na porast trošenja kod krhkih materijala, dok oštrije čestice bolje odnose materijal s duktilne površine od okruglih čestica.

Utjecaj veličine krutih čestica na erozijsko trošenje prikazuje dijagram na slici 4.



Slika 4 – utjecaj veličine krutih čestica na erozijsko trošenje, [8]

Iz dijagrama na slici 4 vidljivo je da erozijsko trošenje raste s porastom veličine krutih čestica, što je i razumljivo, budući da veće čestice znače i veću udarnu energiju koja se prenosi na trošenu površinu u trenutku sudara, stoga je također razumljiva i povećana erozijska osjetljivost krhkih materijala na porast veličine erozijskih čestica.

Kroz gotovo sva prethodna i brojna druga istraživanja također se konstantno ukazivalo i na izuzetno značajan odnos tvrdoća abrazivskih čestica i trošene površine, budući da su svi analizirani utjecaji definirani u okvirima navedenih tvrdoća.

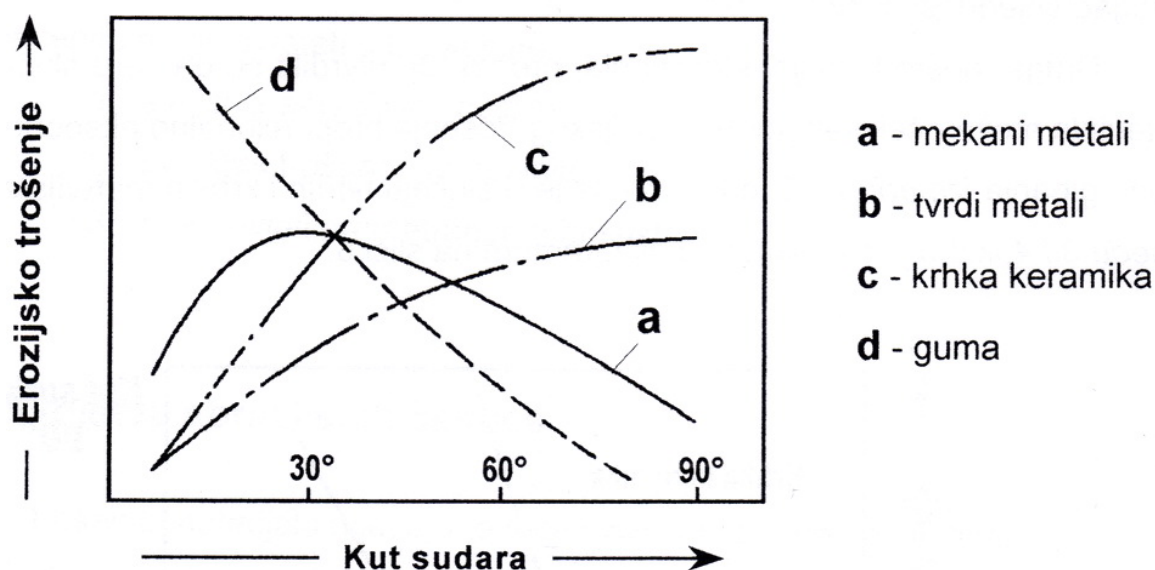
Posebna pozornost u istraživanju erozije česticama posvećena je utjecajima brzine i kuta sudara čestica s trošenom površinom.

Utvrđeno je da oštre erozijske čestice odnose materijal s trošene površine mikrobrazdanjem i/ili mikrorezanjem pri malim kutovima sudara koji su, ovisni o vrsti

trošenog materijala, uglavnom manji od 40° [7,9,10]. Mehanizam trošenja tada je identičan mehanizmu abrazije.

Na slično je ukazao i Ivušić [1] zaključkom da pri izboru materijala otpornih eroziji česticama pri manjim kutovima (do 30°) vrijede načela izbora materijala otpornih abraziji.

Utjecaj kuta sudara krutih čestica s trošenom površinom, izveden iz više različitih istraživanja, prema [11], prikazan je na slici 5.



Slika 5 – Utjecaj kuta sudara na erozijsko trošenje krutim česticama, [11]

Prema dijagramu na slici 5 općenito se može reći da s porastom kuta sudara od 0° do 90° kod mekanih materijala (a i d) opada erozijsko trošenje, dok kod tvrdih i krhkih materijala (b i c) erozijsko trošenje raste. Također je uočljivo da se kod mekanih materijala (a) najveće erozijsko trošenje događa pri kutu sudara od oko 30° .

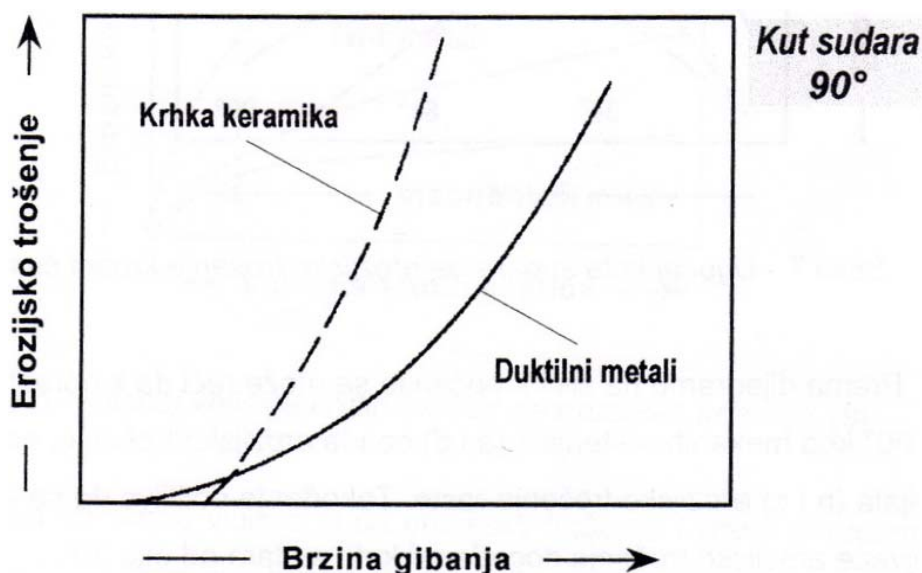
U istim istraživanjima ukazano je na vrlo značajna miješanja utjecaja (interakcija) veličine krute čestice i njezine brzine gibanja pri istraživanju utjecaja kuta sudara na erozijsko trošenje materijala. Uz ranije spomenutu činjenicu da porast veličine čestice povećava njenu udarnu energiju, a time i intenzitet trošenja, isto se može zaključiti i za njezinu brzinu gibanja.

Brzina gibanja krute čestice, kojom se ista sudara s trošenom površinom, glavni je čimbenik njezine udarne energije, budući da se radi o kinetičkoj energiji u čijem iznosu sudjeluje s kvadratom ovisnosti. Stoga brzina gibanja ima vrlo izražen utjecaj na intenzitet erozijskog trošenja krutim česticama [4,9,12,13].

U svim istraživanjima je utvrđeno da s porastom brzine gibanja čestica raste i intenzitet erozijskog trošenja koje iste uzrokuju, no erozijski učinak značajno ovisi o svojstvima trošene površine. Razlog je u tome, što je za početak erozijskog trošenja tvrdih i krhkih materijala potreban niži minimum udarne energije nego kod duktilnih materijala.

Slijedom toga, prema [11], utvrđeno je da u slučaju duktilnih materijala erozijsko trošenje raste proporcionalno kvadratnom porastu brzine gibanja (v^2). No, također je utvrđeno da je kod nekih tvrdih i krhkih materijala erozijsko trošenje raslo i s većim eksponentom porasta brzine gibanja, a u slučaju krhke keramike taj eksponent je čak dosegao vrijednost 6 (v^6).

Druga, nešto kasnija istraživanja, prema [5], utvrdila su da se u slučaju duktilnih materijala može očekivati porast erozijskog trošenja proporcionalno eksponentu porasta brzine gibanja između 2 i 3, odnosno da je u slučaju tvrdih i krhkih materijala eksponent između 3 i 4, kao što je prikazano dijagramom na slici 6.

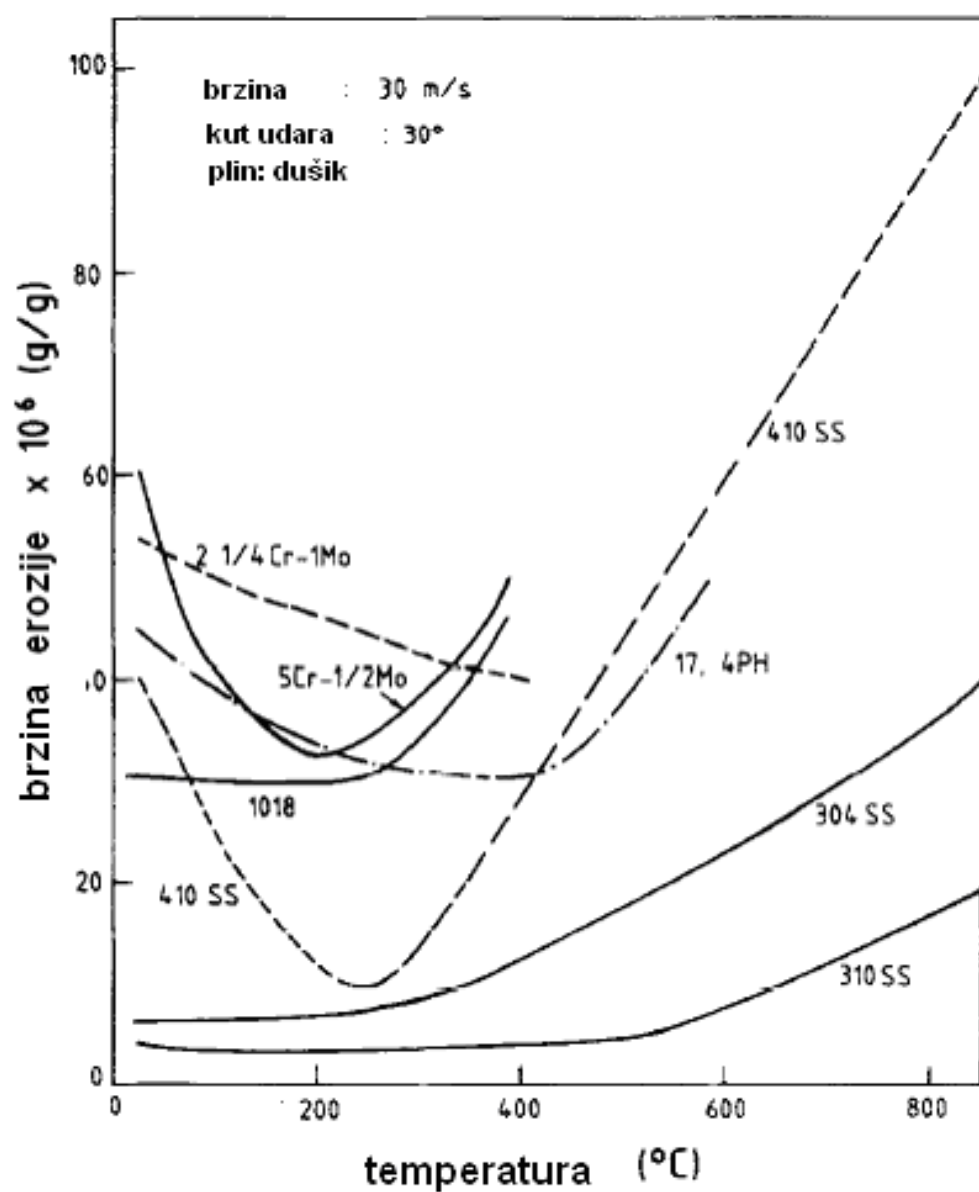


Slika 6 – Utjecaj brzine gibanja na erozijsko trošenje krutim česticama,[8]

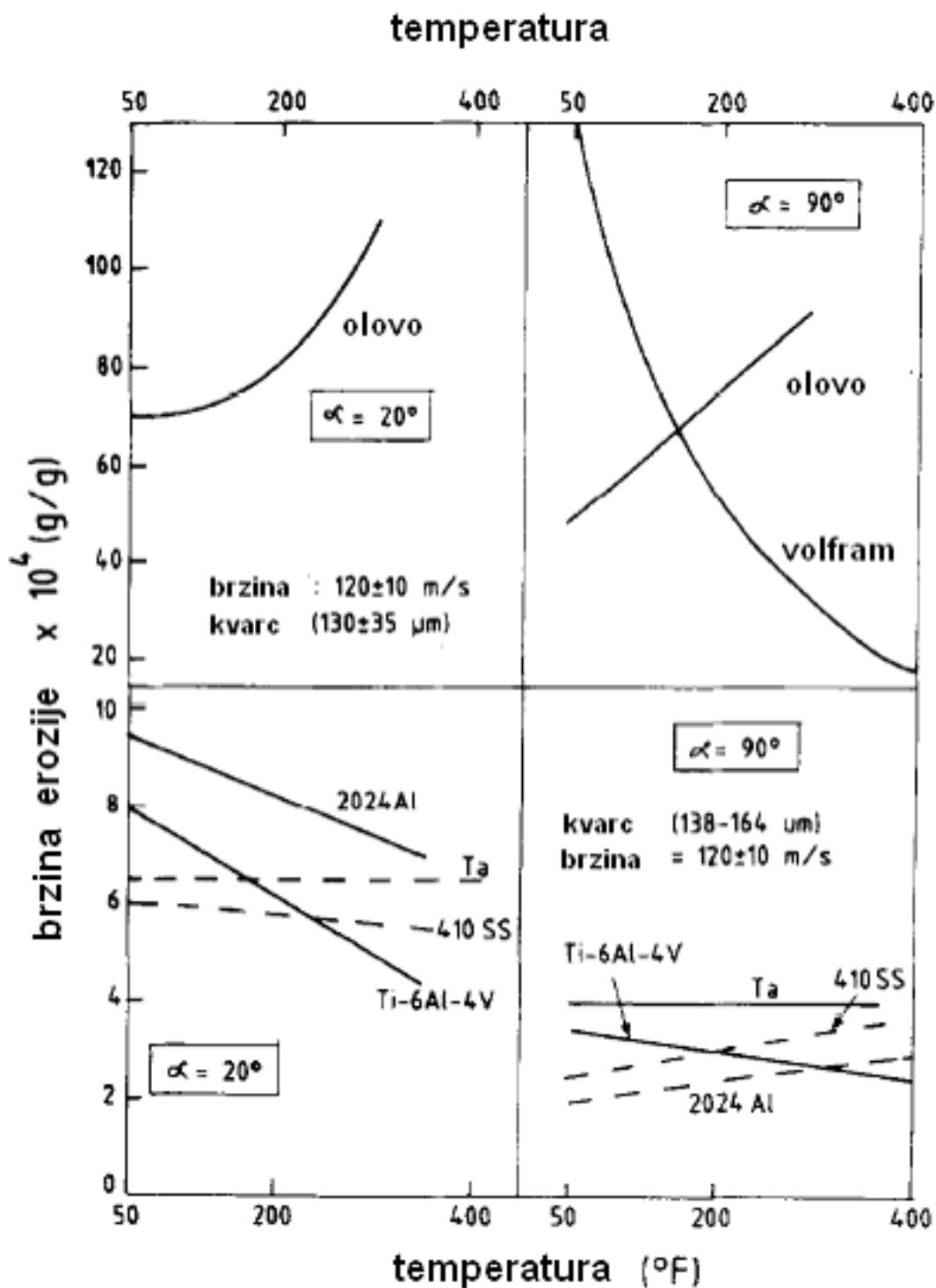
Pri eroziji česticama, jako bitan uvjet je temperatura okoline u kojoj se proces događa. Pripadajuća ovisnost može se podijeliti u 3 grupe. U prvoj grupi, brzina erozije pada s porastom temperature, doseže minimum, te zatim raste s povišenjem temperature. U ovu skupinu spadaju 5Cr-OSMo, 17-4PH, 41OSS, "Alloy 800", Ti-6Al-4V i volfram.

Druga skupina materijala pokazuje neosjetljivost na porast temperature, sve dok temperatura ne dostigne kritičnu vrijednost. Nakon toga, brzina erozije raste s porastom temperature. U ovu skupinu spadaju materijali poput 310SS, čelik 1018, 1100 Al.

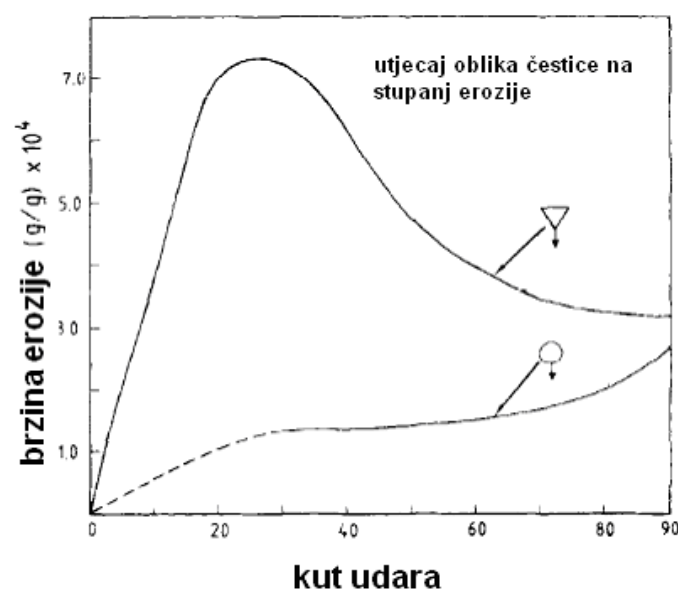
Treća skupina materijala pokazuje svojstvo konstantnog porasta brzine erozije s porastom temperature. U ovu skupinu spadaju materijali poput ugljičnih čelika, 12Cr- Mo-V čelik, olovo.



Slika 7 – Ovisnost brzine erozije o temperaturi za neke materijale, [14]



Slika 8 – Ovisnost brzine erozije o temperaturi za neke materijale pri različitim kutovima udara, [14]

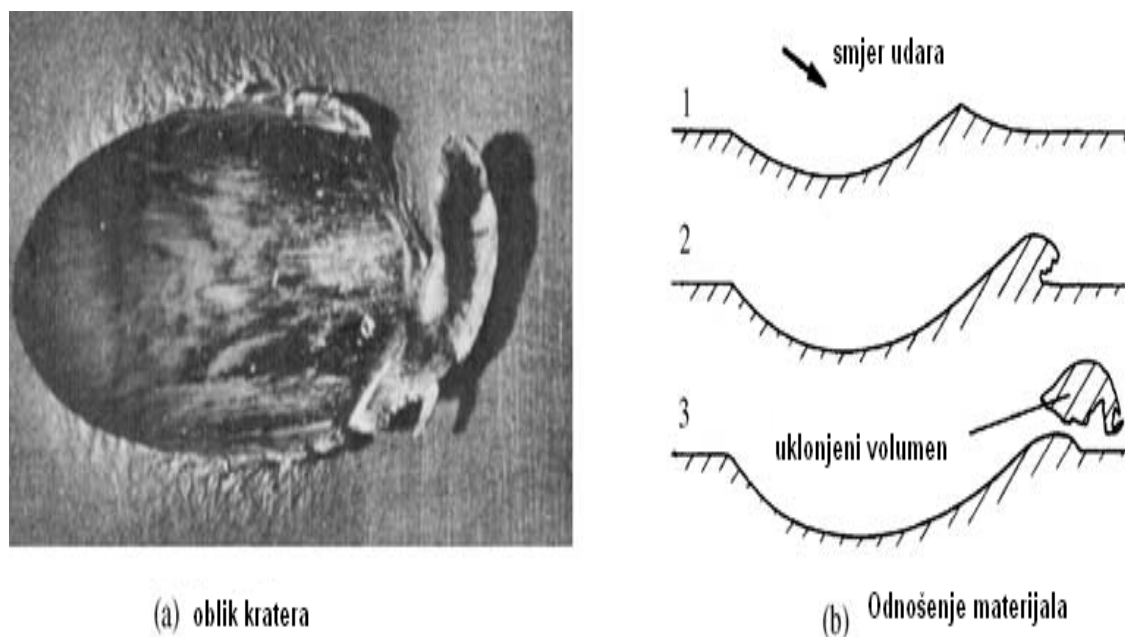


Slika 9 – Utjecaj oblika abrazivne čestice na brzinu erozije, [14]

2.3. PLAN PROVOĐENJA ISPITIVANJA OTPORNOSTI NA EROZIJSKO TROŠENJE

2.3.1. MODEL EROZIJE POVRŠINE

Razmatra se udarno djelovanje jedne čestice. Na slici 10 prikazana je shema udara jedne čestice u površinu materijala.



Slika 10 – Model udara krute čestice u površinu materijala, [15]

Iz sheme je vidljiv presjek kratera i oblik deformiranog i istisnutog materijala pri udaru i usijecanju čestice abraziva.

Abrazivna čestica udarajući u površinu pod kutom α_u usijeca se i prodire u metal, pri tome ga deformira, istiskuje i ostavlja na njemu brazdastu putanju. Učestalim udaranjem, tj. usijecanjem, deformiranjem, istiskivanjem i prodiranjem čestica u metal dolazi do odnošenja materijala i smanjenja volumena. Formiranje istisnutog materijala u obliku valova na rubovima kratera i brazdi, te udaranje čestica u te valove ima prevladavajuću ulogu za proces erozije. Pri odnošenju deformiranih valova istisnutog materijala, pored udarnog djelovanja čestica, značajan utjecaj ima i njihovo čisto abrazivno djelovanje.

Kod procesa erozije prisutan je mehanizam mehaničke mikroobrade i mehanizam umora materijala zbog učestalog udaranja čestica.

1958. Finnie [16] je razmatrao putanju vrha krutog zrna iz abrazivnog sredstva koje reže površinu idealnog duktilnog materijala. Uz brojne pretpostavke koje je iznio u spomenutom i drugim radovima [17,18], pretpostavljeno je da je volumen V materijala skinutog s površine masom m erodiranih čestica proporcionalan:

$$V = \frac{mv^2 f(\alpha_u)}{p} \quad (1)$$

Gdje je: v - brzina čestice, $[m/s]$

$f(\alpha_u)$ - funkcija kuta upada α_u između površine i vektora brzine čestice

p - horizontalna komponenta pritiska između čestice i površine, $[Pa]$

m - masa erodiranih čestica, $[kg]$

Ovaj pristup uspješno predviđa većinu oblika erozije duktilnih materijala kada je kut α_u manji od 45° , ali ne može predvidjeti eroziju za kut α_u veći od 45° .

Svoj model erozije iznijeli su Sheldon i Kanshere [19]. Njihov izvod odnosi se na kut upada abraziva $\alpha_u = 90^\circ$ i sastoji se od energetske ravnoteže između kinetičke energije čestica i rada utrošenog pri zarezivanju čestice u površinu.

Rezultat je ovisnost:

$$V = D^3 v^3 \left(\frac{\rho}{HV} \right)^{3/2} \quad (2)$$

Gdje je: D - promjer čestica, $[m]$

v - brzina čestice, $[m/s]$

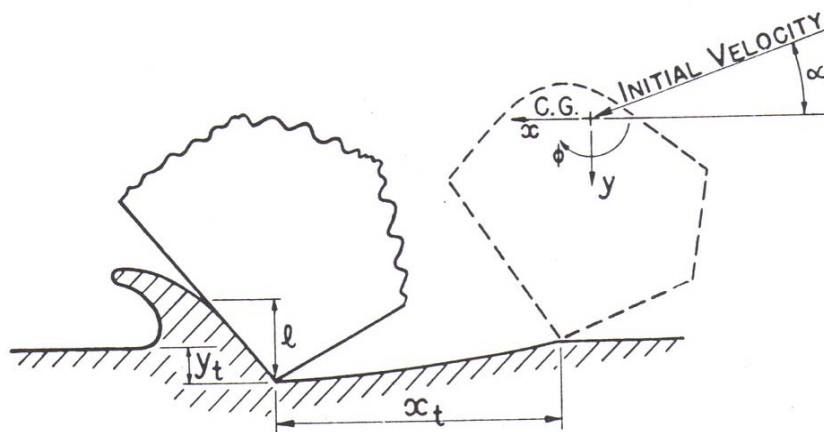
ρ - gustoća čestica, $[kg/m^3]$

HV - tvrdoća u Vickersima

2.3.2. DEFINIRANJE ELEMENATA TRIBOSUSTAVA

Erozijsko trošenje krutim česticama jedan je od oblika tribosustava gdje su dominantni mehanizmi trošenja abrazija i umor površine materijala.

Općeniti prikaz tribosustava za eroziju česticama dan je na slici 11 a opisani su i elementi tribosustava koji je predmet ovog ispitivanja.



Slika 11 – Shematski prikaz tribosustava kod erozije česticama, [20]

2.3.3. ERODIRANI MATERIJAL

Materijal koji će se erodirati krutim česticama je izotermički poboljšani nodularni ljev (eng. Austempered Ductile Iron – ADI). On predstavlja novu vrstu ljevova koji zamjenjuju konstrukcijske čelike i čelične ljevove kod onih dijelova kod kojih se traži visoka čvrstoća, istezljivost, žilavost, dinamička izdržljivost te otpornost na trošenje.

Izotermičkim poboljšavanjem nodularnog lijeva postiže se u mikrostrukturi željezne matrice bainit sa zaostalim austenitom nakon čega odljevak pokazuje bolja mehanička svojstva u odnosu na ljevano ili klasično poboljšano stanje.

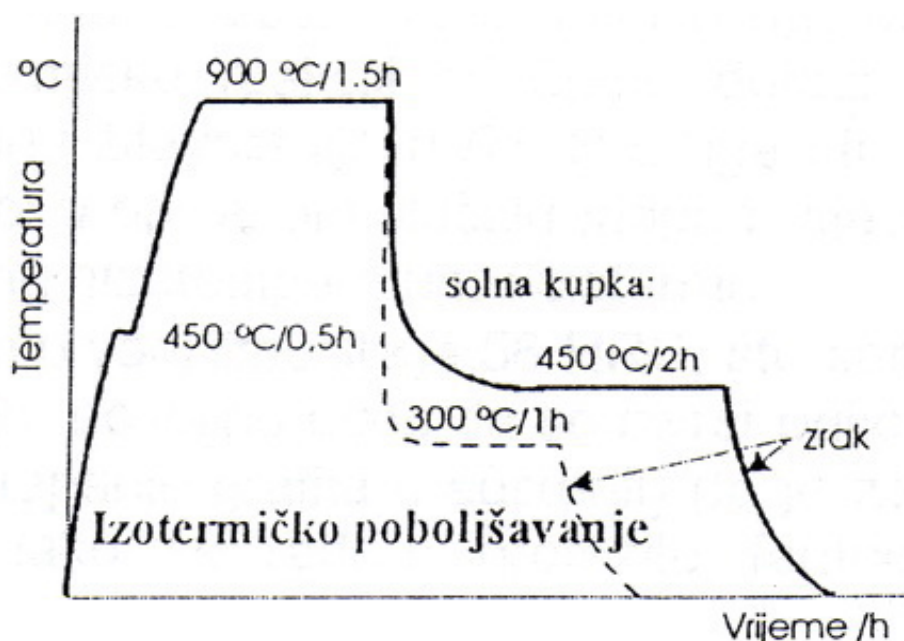
Ova se svojstva postižu samo ako su ostvarena dva osnovna uvjeta:

- Nodularni ljev mora biti visokokvalitetan, tj. mora imati visoki broj nodula, bez poroznosti, itd.

- Treba propisati precizne parametre postupka (prikladni TTT dijagram) i posjedovati odgovarajuću opremu.

Nodularni lijev mora biti precizno legiran odgovarajućim elementima (Ni, Mo, Cu, Mn) jer male razlike u udjelu pojedinih elemenata mogu značajno promijeniti uvjete i dovesti do drugačije, tj. nepoželjne strukture.

Dijagram na slici 12 prikazuje proces toplinske obrade (izotermičkog poboljšavanja) nodularnog lijeva.



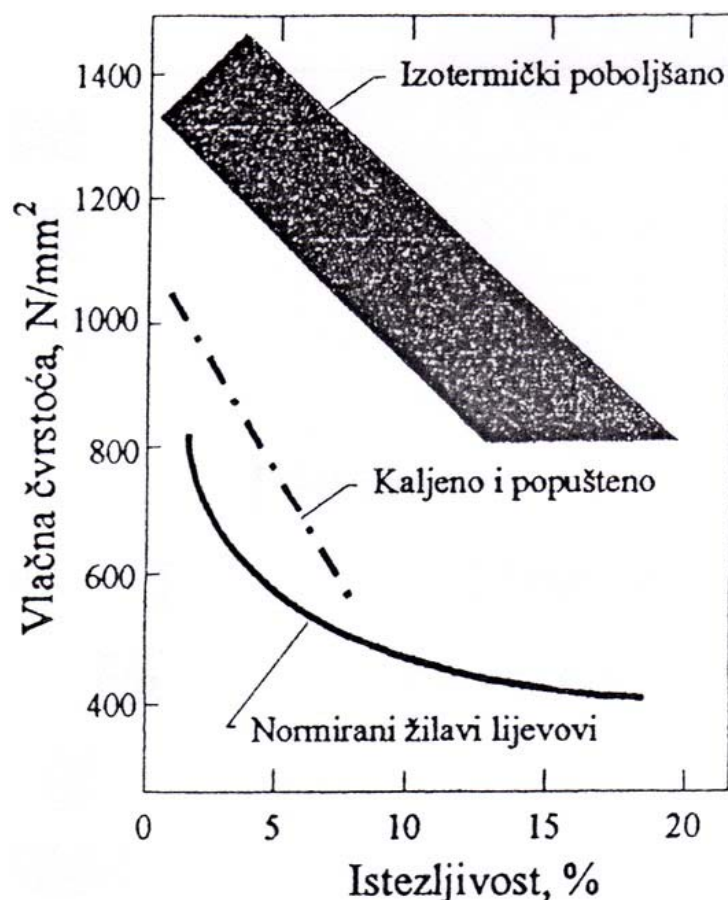
Slika 12 – Izotermičko poboljšavanje nodularnog lijeva, [21]

Toplinska obrada se sastoji od austenitizacije nodularnog lijeva na otprilike 850 - 950° C nakon čega se isti izotermički poboljšava u solnoj kupci na gornji ili donji bainit.

Prilikom pretvorbe na gornji bainit, koja se provodi na temperaturi od otprilike 450° C, nastaje mikrostruktura bainita i stabiliziranog zaostalog austenita obogaćenog ugljikom.

Prilikom pretvorbe na donji bainit, koja se provodi na temperaturi od otprilike 300° C, nastaje bainitna mikrostruktura s precipitiranim karbidima i zaostalim austenitom.

Slika 13 prikazuje razliku u vlačnoj čvrstoći i istezljivosti između klasičnog nodularnog lijeva i izotermički poboljšanog nodularnog lijeva.



Slika 13 – Razlika u mehaničkim svojstvima između klasičnog nodularnog lijeva i izotermički poboljšanog nodularnog lijeva, [21]

Tipični primjeri primjene izotermički poboljšanog nodularnog lijeva su:

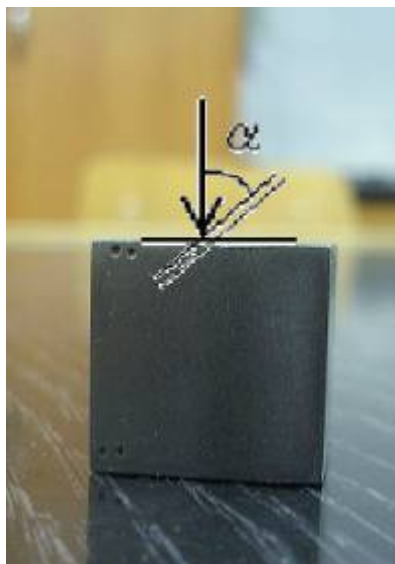
- Zupčanici
- Oslonci opruga na podvozju kamiona
- Kotači tramvaja
- Valjci u valjaonicama
- Radilice diesel motora
- Koljenaste osovine

2.3.4. ABRAZIV

Abraziv u ovom tribosustavu su čestice kvarcnog pijeska OTAWA AFS 50/70 veličine oko 300 μm i tvrdoće oko 1200 HV0.03, te dvije vrste čelične sačme srednjeg promjera 1100 μm i 700 μm .

2.3.5. KUT UPADA ABRAZIVA

Kut upada abraziva je definiran kao nagib između površine materijala i putanje čestica abraziva. Slika 14 prikazuje način određivanja kuta upada abraziva.



Slika 14 – Kut upada abraziva, [22]

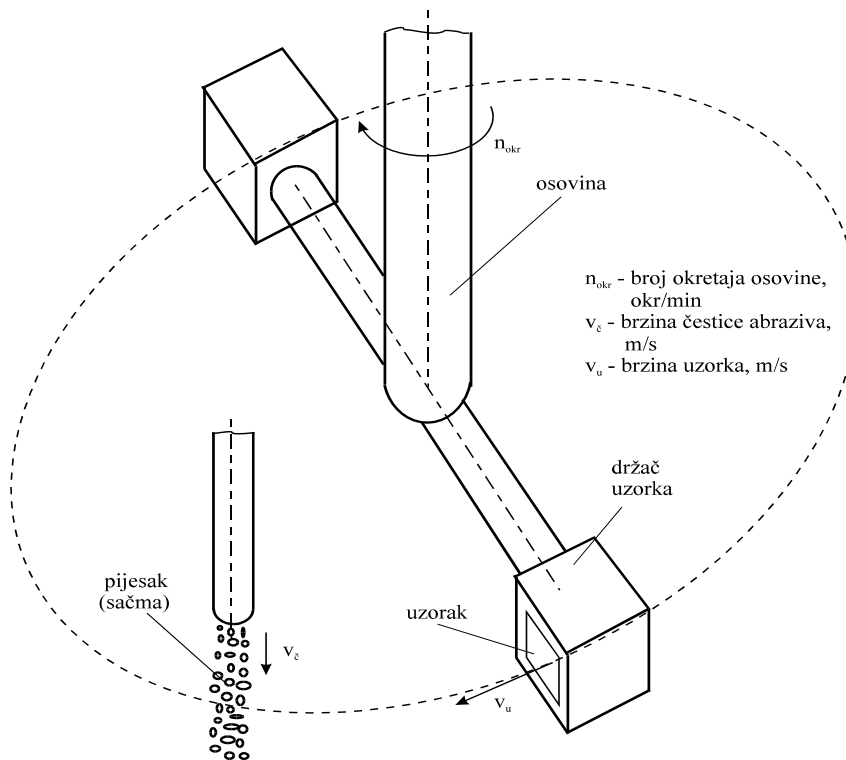
U ovom radu svi uzorci ispitivanog materijala bit će izloženi erodiranju pod šest različitih kutova upada čestica, i to pod: 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, tako da će na svakoj stranici kvadratnog uzorka biti ispitivan po jedan kut.

2.3.6. PARAMETRI ISPITIVANJA

Svaki uzorak će biti podvrgnut erozijskom trošenju tako da će se u uređaju okretati brzinom 1440 okr/min. Abraziv prolazi (pada pomoću gravitacije) kroz sapnicu promjera 5 mm, udaljenost sapnice od uzorka je 3 mm.

Vrijeme ispitivanja je određeno na 13 minuta i 53 sekunde, što odgovara broju od 20 000 ciklusa, tj. okretaja uređaja.

Schema uređaja za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje prikazana je na slici 15.



Slika 15 – Shema uređaja za ispitivanje erozijskog trošenja, [1]

Ispitni uzorci trebaju biti dimenzija 20x20x20 mm i pričvršćuju se pomoću vijaka na držač uzoraka. Držač uzoraka pričvršćen je na osovinu uređaja i rotira se brzinom od 1440 okr/min pa je brzina vrtnje uzorka:

$$v_u = \frac{D\pi n_{okr}}{60} = 24,265 \text{ m/s} \quad (3)$$

Gdje je: D - promjer na kojem su pričvršćeni uzorci ($D=322$ mm)

n_{okr} - broj okretaja osovine (držača), okr/min

v_u - brzina vrtnje uzorka, [m/s]

Prema tome ispitni uzorci će udarati u abrazivne čestice brzinom 24,265 m/s. Nakon završetka ispitivanja (erodiranja) svake stranice na pojedinom uzorku, isti će se vagati na vagi s rezolucijom 10^{-4} g.

Stupanj erozije će se određivati s pomoću određivanja gubitka mase prilikom vaganja nakon erozije svake stranice na pojedinom uzorku.

Na ovaj način odrediti će se otpornost na erozijsko trošenje izotermički poboljšanog nodularnog lijeva u ovisnosti na vrstu, veličinu i kut upada abraziva.

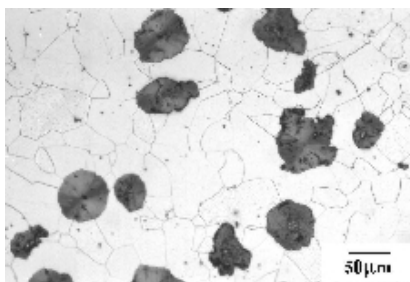
3. NODULARNI LIJEV

Lijeivano željezo se proizvodi iz sirovog željeza, starog lijevanog željeza i starog čelika. Lijeivano željezo je legura željeza, ugljika i silicija, koja tipično sadrži od 2 do 4 % C i 0,5 do 3 % Si i manje količine mangana, fosfora i sumpora. Za lijevano željezo je karakteristično da se veće količine ugljika nalaze u njegovoj strukturi kao čisti ugljen ili grafit.

3.1. DOBIVANJE NODULARNOG LIJEVA

Nodularni lijev se dobiva dodavanjem magnezija u rastaljeno lijevano željezo, koje sadrži relativno visoki sadržaj ugljika. Magnezij uzrokuje kristalizaciju grafita u obliku kuglica. Nekoliko je koraka je potrebno da se proizvede ovaj lijev:

1. Desumporizacija- sumpor uzrokuje rast grafita u listićima. Ljevovi s malom količinom sumpora se dobivaju topljenjem u pećima, koje odstranjuju sumpor ili miješanjem željeza sa sredstvima, koje odstranjuju sumpor (kalcijev karbid).
2. Nodulizacija- magnezij koji se dodaje odstranjuje sumpor i kisik i uzrokuje rast kuglastih grafita.
3. Inokulacija- se vrši s FeSi legurama.



Slika 16 – Nodularni lijev, [23]

Tablica II – Mehanička svojstva nodularnog lijeva, [16]

OZNAKA			VLAČNA ČVRSTOĆA	GRANICA RAZVLAČ.	ISTEZANJE	TVRDOĆA	STRUKTURA
EN-GJS	DIN	HRN	R _m N/mm ²	R _{p0,2} N/mm ²	%	HB	
EN-GJS-400	GGG 40	NL 40	400 -550	250-350	15 -27	135-185	ferita
EN-GJS-500	GGG 50	NL 50	500 -650	320-420	7 -18	170 -220	Feritno-perlitna
EN-GJS-600	GGG 60	NL 60	600- 750	380-480	3 - 8	200 -250	Perlitno-ferina
EN-GJS-700	GGG 70	NL 70	700-850	440-600	2-6	235 -285	perlitna

Kemijski sastav nodularnog lijeva razlikuje se od sivog lijeva po tome što sadrži veći postotak ugljika i silicija, ali i magnezija (ili cerija) tako da se grafit izlučuje u obliku kuglica. Osim toga, sadržaj sumpora je znatno niži nego kod sivog lijeva. Metalna osnova u lijevanom stanju može biti monofazna: feritna, perlitna te dvofazna feritno-perlitna.

Legiranjem ili toplinskom obradom mogu se postići i druge strukture. Nodularni lijev je materijal koji osvaja tržište i zamjenjuje druge ljevove na bazi željeza. Nodularni lijev ima mnogo veću čvrstoću nego sivi lijev, ali mu nedostaje sposobnost prigušivanja vibracija i obradivost sivog lijeva. Mehanička svojstva su mu između čeličnog i sivog lijeva: bolje se obrađuje od čelika, ima bolju sposobnost prigušivanja i bolja ljevačka svojstva od čelika. Posebna prednost nodularnog lijeva prema sivom i nelegiranom čeliku je veličina granice razvlačenja. Perlitni nodularni lijev predstavlja najbolji izbor u mnogobrojnim slučajevima primjene. Ako su odljevci izloženi deformacijama i udarnim opterećenjima predlaže se feritni nodularni lijev. Najekonomičnija i najkonkurentnija kvaliteta je feritno - perlitna kvaliteta nodularnog lijeva jer uz veliku čvrstoću ima i dobru otpornost prema trošenju. Toplinskom obradom i legiranjem mogu se proizvesti vrste nodularnog lijeva vrlo velike čvrstoće.

3.2. TOPLINSKA OBRADA NODULARNOG LIJEVA

3.2.1. ŽARENJE ZA REDUKCIJU NAPETOSTI

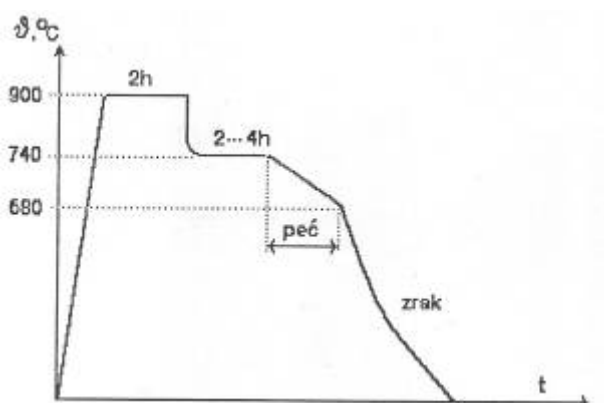
Prilikom žarenja odljevci se zagrijevaju na temperaturu od oko 550°C i drže na toj temperaturi 2-4 sata. Nakon toga se odljevci hlade u peći. Tim postupkom se reducira 80-90% napetosti.

3.2.2. GRAFITIZACIJSKO ŽARENJE ZA ELIMINACIJU SLOBODNOG CEMENTITA

Takvo žarenje se prvobitno upotrebljava zbog eliminacije $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{slob.}}$. Pri tome struktura ostaje feritno-perlitna te se poboljšavaju plastična svojstva materijala i obradivost odvajanjem čestica.

3.2.3. GRAFITIZACIJSKO ŽARENJE ZA POSTIZANJE FERITNE STRUKTURE

Grafitizacijskim žarenjem za postizanje feritne strukture raste produljenje nakon kidanja i žilavost, a snižava se vlačna čvrstoća i otpornost na trošenje, te se poboljšava obradivost odvajanjem čestica.



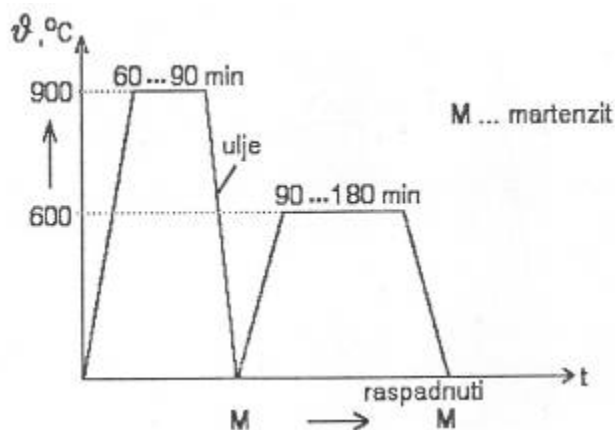
Slika 17 – Grafitizacijsko žarenje za postizanje feritne strukture, [24]

3.2.4. NORMALIZACIJA

Normalizacijom se postiže rast granice razvlačenja $R_{p0,2}$ za oko 40%, te rast otpornosti na trošenje.

3.2.5. POBOLJŠAVANJE NODULARNOG LIJEVA

Poboljšavanjem se postiže visoka tvrdoća (HRC), otpornost na trošenje, visoka čvrstoća (R_m), granica razvlačenja ($R_{p0,2}$), te povišena žilavost (KU)



Slika 18 – Poboljšavanje nodularnog lijeva, [24]

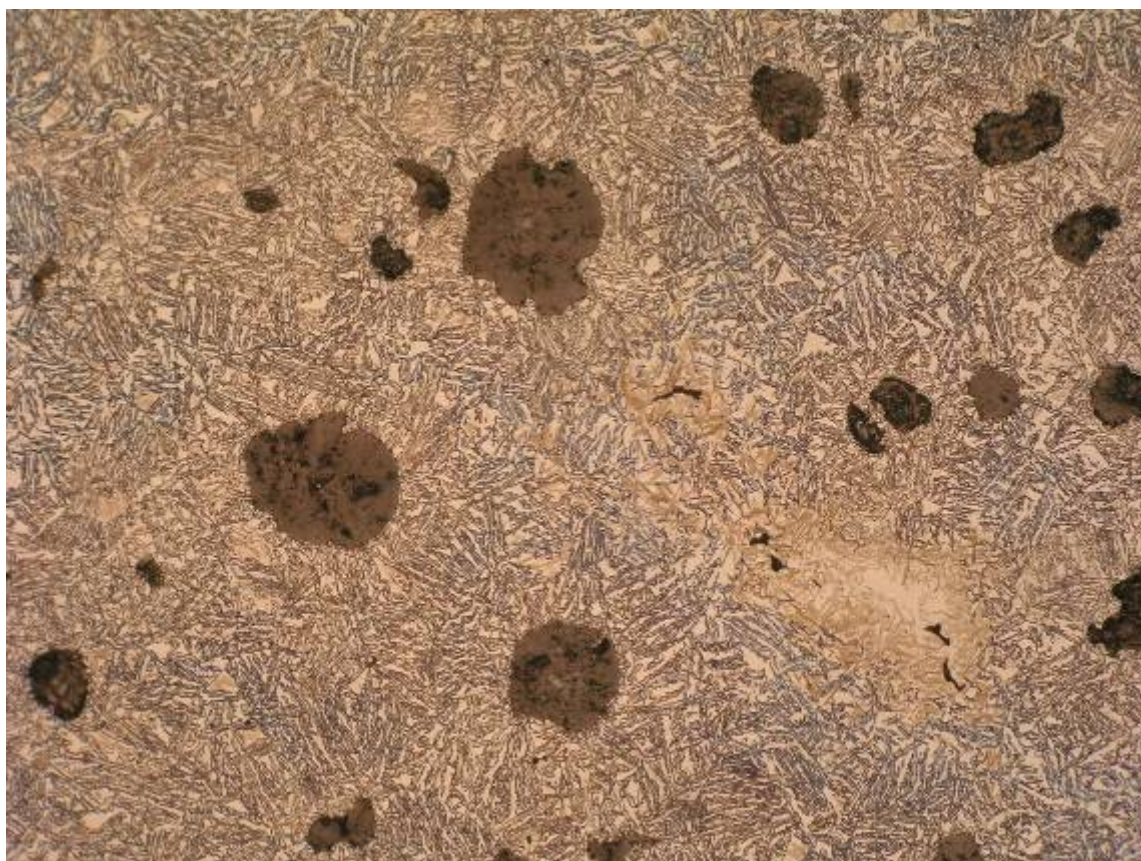
3.2.6. POVRŠINSKO KALJENJE

Površinsko kaljenje se izvodi na temperaturama od 950 do 1100°C, a gasi se u vodi ili ulju. Kaljenje može plinsko ili indukcijsko. Površinskim kaljenjem se dobije martenzitna struktura površine, dok struktura jezgre ostaje feritno-perlitna. Kaljenje se provodi samo ako se zahtjeva otpornost na trošenje, tvrda površina i žilava jezgra.

3.3 IZOTERMIČKI POBOLJŠANI NODULARNI LIJEV

Izotermički poboljšani nodularni lijev (eng. Austempered Ductile Iron - ADI) spada u grupu toplinski tretiranih željeznih ljevova koji su poznati pod ASTM 897M and EN1564 standardnim normama.

Izotermičko poboljšavanje nodularnog lijeva spada u skupinu postupaka kojima se mijenja struktura cijelog volumena, a provodi se u cilju povišenja mehaničkih svojstava odljevaka (čvrstoće, istezljivosti, žilavosti, dinamičke izdržljivosti itd.).



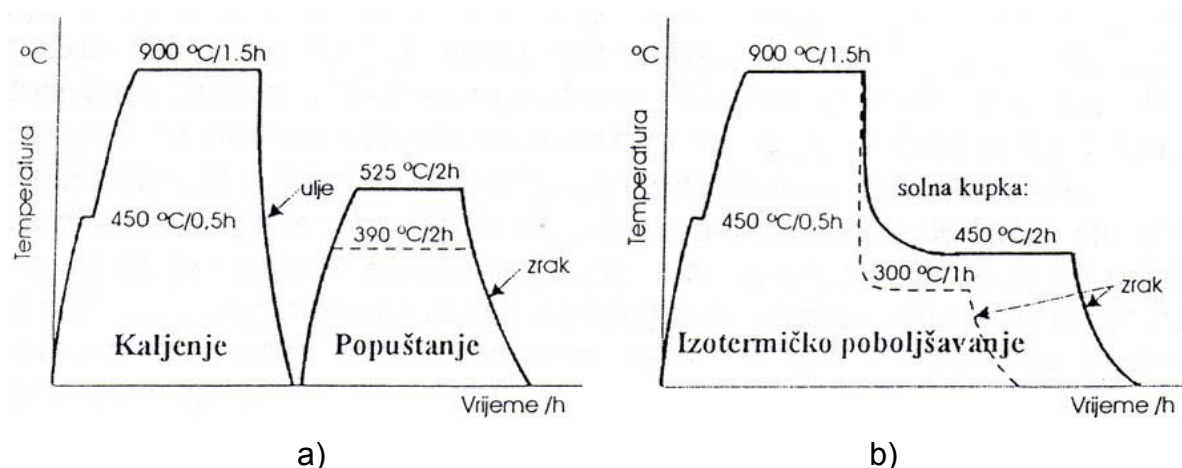
Slika 19 – Izotermički poboljšani nodularni lijev

Ovaj se postupak prvi puta počeo primjenjivati 1976. g. najavom tvrtke General Motors Co da će tanjurasti hiploidni zupčanik i njegov pogonski zupčanik u diferencijalu nekih vozila biti izrađen od izotermički poboljšanog nodularnog lijeva.

Izotermičkim poboljšavanjem postižu se znatno bolja svojstva kako u odnosu na lijevano tako i u odnosu na klasično poboljšano stanje. Dok je čvrstoća uobičajenih nodularnih lijevova od 400 do 800 N/mm², čvrstoća izotermički poboljšanog nodularnog lijeva može doseći 1400 N/mm². Unatoč tako visokoj čvrstoći, izotermički poboljšani nodularni lijev ima razmjerno visoke vrijednosti istezljivosti, dinamičke izdržljivosti i žilavosti. Zato se ovaj materijal danas često upotrebljava u industriji motora, motornih vozila, poljoprivrednih i građevinskih strojeva. Također se koristi kao zamjena za čelične otkovke, odljevke, dijelove od valjanih profila. Primjenom izotermički poboljšanog nodularnog lijeva ostvaruju se značajne uštede

3.3.1. OPIS POSTUPKA IZOTERMIČKOG POBOLJŠAVANJA

Za razliku od uobičajenog (klasičnog) poboljšavanja, kod izotermičkog poboljšavanja poboljšava se austenitizirani nodularni lijev te se naglo ohlađuje na temperaturu izotermičke pretvorbe, (u područje stvaranja bainita), drži dovoljno dugo i nakon toga ohlađuje (najčešće na zraku) do sobne temperature. Shematski prikaz postupka izotermičkog poboljšavanja nodularnog lijeva prikazan je na slici 20.



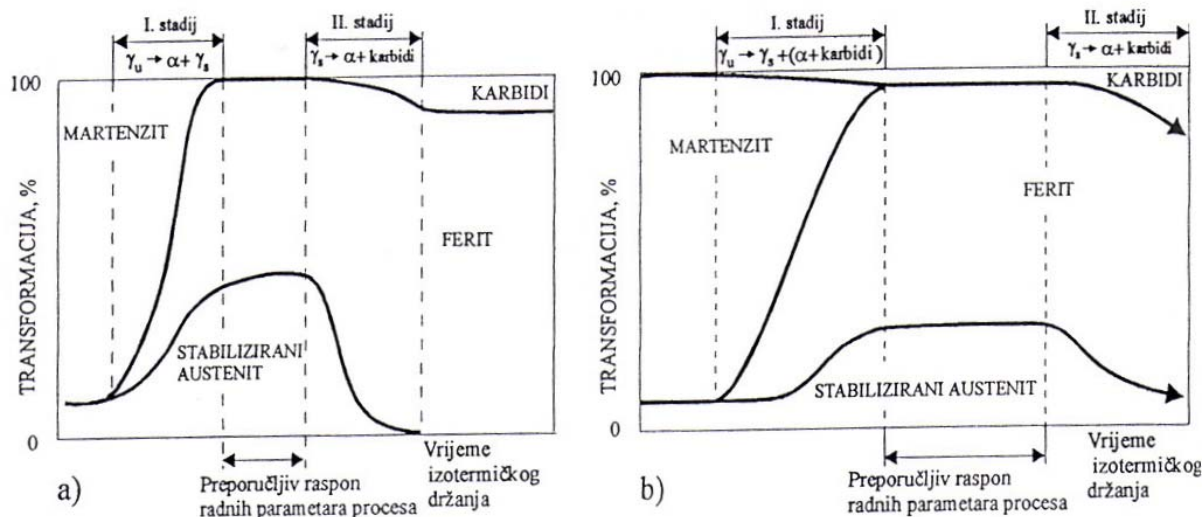
Slika 20 – Shematski prikaz postupka izotermičkog poboljšavanja nodularnog lijeva:
 (a) – dijagram postupka; (b) – izotermički TTT dijagram, [21]

Austenitizaciju treba provesti (ovisno o vrsti i kemijskom sastavu nodularnog lijeva) pri dovoljno visokoj temperaturi (od 850 do 950 °C) razmjerno dugo (oko 90 min) da se otopi što više ugljika u austenitu.

Ovisno o visini izotermičke pretvorbe (\mathcal{G}_{iz}) postići će se osnovna mikrostruktura gornjeg bainita (ako je \mathcal{G}_{iz} viša) ili mikrostruktura donjeg bainita (ako je \mathcal{G}_{iz} niža) što će rezultirati i različitim svojstvima.

Izotermička pretvorba austenita kod nodularnog lijeva razlikuje se od one kod čelika. Kod izotermičkog poboljšavanja izlučuje se bainitni ferit iz austenita i koji urasta u austenit. Istovremeno izdvaja se ugljik iz rastućih feritnih listića u austenit. Pretvorba austenita kod nodularnog lijeva odvija se u dva stadija [1,3]. Slika 21 prikazuje shematski strukturne transformacije pri izotermičkom poboljšavanju nelegiranog nodularnog lijeva i to za višu i nižu temperaturu izotermičke pretvorbe.

U I. stadiju pri višoj \mathcal{G}_{iz} (slika 21a) najprije nastaje i raste bainitni ferit i to na granicama austenita ili u blizini grafitnih nodula. Visoki sadržaj Si u nodularnom lijevu sprečava nastajanje karbida (koji je normalno sastavni dio bainitne reakcije), te se zbog toga preostali austenit obogaćuje ugljikom. Nakon nekog vremena austenit je toliko obogaćen ugljikom (do 2%) da postaje stabilan sve do temperatura ispod sobne. Kako se austenit obogaćuje ugljikom, on sprečava rast bainitnog ferita i reakcija će najzad stati. Ova transformacija austenita u bainitni ferit i ugljikom obogaćeni austenit poznata je kao reakcija I. stadija. Po završetku I. stadija austenit je dovoljno stabiliziran da se ne može transformirati u martenzit hlađenjem do sobne temperature.



Slika 21 – Shematski prikaz izotermičke pretvorbe austenita nodularnog lijeva na višoj (a) i nižoj (b) temperaturi izotermičke pretvorbe, [25]

Nešto su drugačija zbivanja (u I. stadiju) u slučaju pretvorbe austenita pri nižoj temperaturi (ϑ_{iz}). Zbog slabije difuzije ugljika dolazi do nastanka vrlo fine mikrostrukture bainitnog ferita s precipitiranim karbidima i stabiliziranog austenita, slika 21b.

Daljnijim držanjem na temperaturi izotermičke pretvorbe dolazi do raspada austenita na ferit i karbid što se označuje kao II. stadij i drastično smanjuje duktilnost i žilavost.

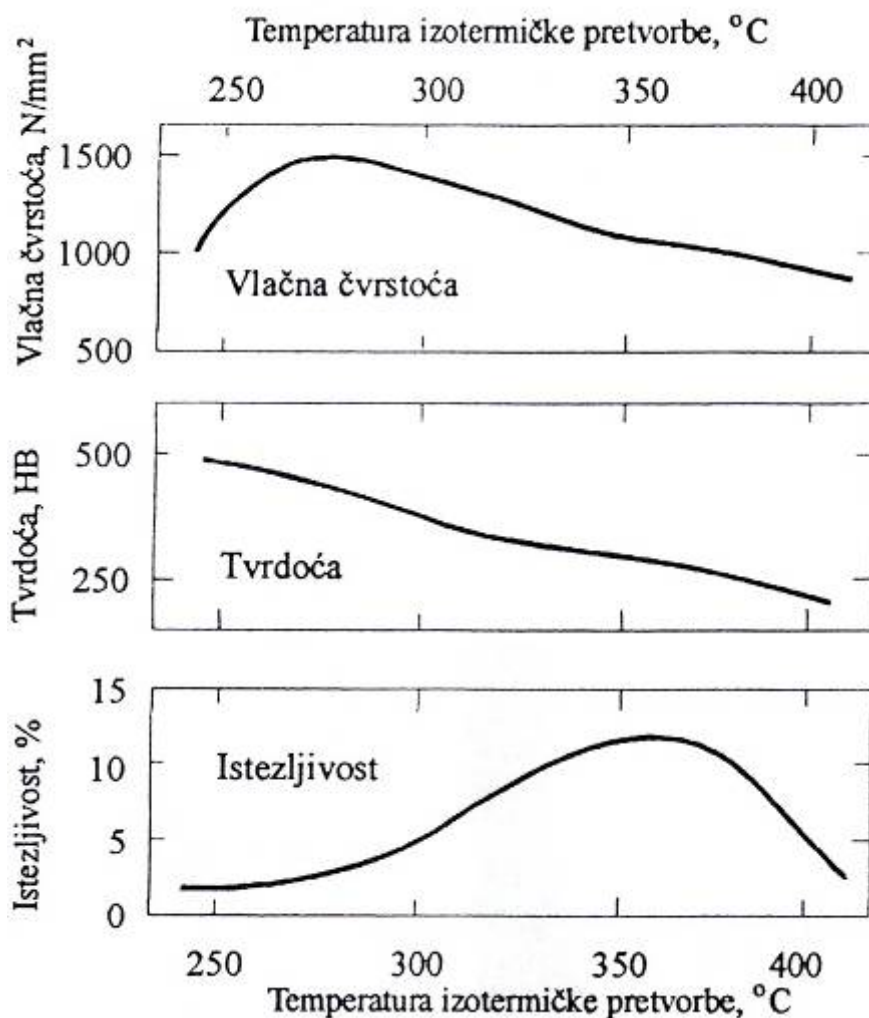
Nedovoljno dugo držanje na ϑ_{iz} ne omogućuje dovoljnu stabilizaciju austenita pa se on ohlađivanjem do sobne temperature može transformirati u martenzit (nepoželjno!).

Budući da je svrha izotermičkog poboljšavanja dobivanje mikrostrukture željezne matrice nodularnog lijeva s bainitnim feritom i zaostalim austenitom (čak do 50%), optimalno trajanje držanja na temperaturi izotermičke pretvorbe je između početka I. i završetka II. stadija. To vrijeme ovisi o kemijskom sastavu nodularnog lijeva, temperaturi austenitizacije i temperaturi izotermičke pretvorbe. Izotermički poboljšan nodularni lijev na opisani način će imati optimalna svojstva.

3.3.2. SVOJSTVA IZOTERMIČKI POBOLJŠANOG NODULARNOG LIJEVA

Svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva ovise o postignutoj mikrostrukturi. Uobičajene temperature izotermičkog poboljšavanja kreću se od 230° do 400°, pa se njihovim izborom mogu varirati svojstva u širokim granicama, slika 22. Praktički se svi slučajevi izotermičkog poboljšavanja mogu svrstati u dvije osnovne skupine:

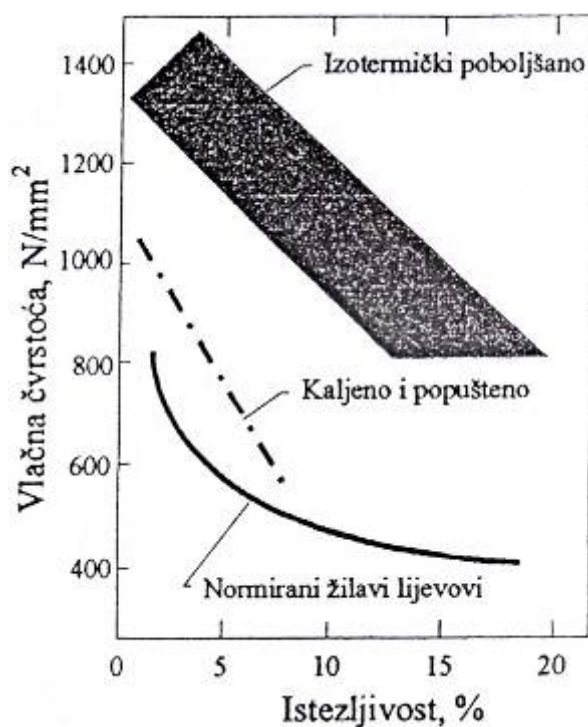
- kada su odljevci izotermički poboljšani na nižim \mathcal{G}_{iz} , dobiva se mikrostruktura fino zrnatog bainitnog ferita sa zaostalim austenitom (donji bainit), tvrdoće iznad 40 HRC a primjenjuje se kada se uz dobru žilavost traži otpornost na visoke specifične pritiske i visoka otpornost na trošenje (npr. kod zupčanika)
- kada su odljevci poboljšani na višim \mathcal{G}_{iz} dobit će se mikrostruktura bainitnog ferita i zaostalog austenita (gornji bainit), tvrdoće 27 do 38 HRC. Odljevak će u tom slučaju imati visoku žilavost, duktilnost i dinamičku izdržljivost, ali nešto slabiju otpornost na trošenje.



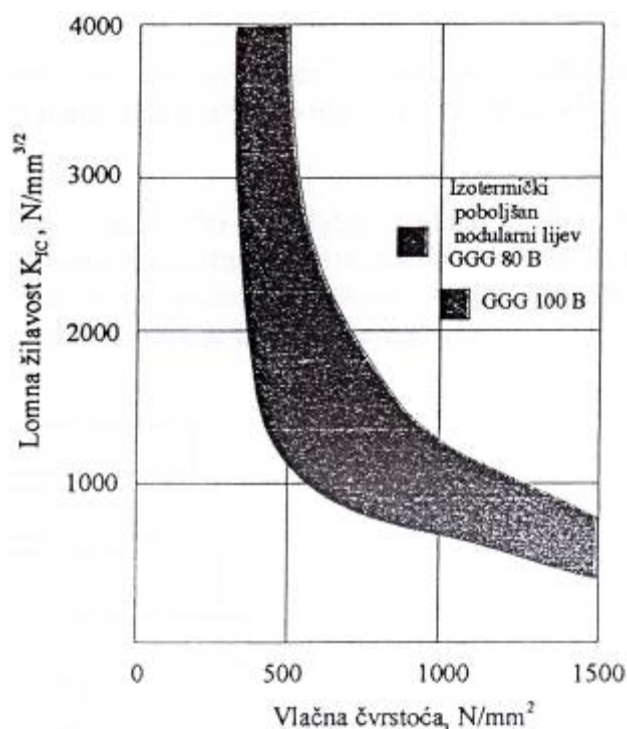
Slika 22 – Utjecaj temperature izotermičke pretvorbe na mehanička svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva, [26]

Jedna od najvažnijih karakteristika izotermički poboljšanog nodularnog lijeva je da se može postići dvostruko veća vlačna čvrstoća (od normiranih ljevova) uz zadržavanje visokih iznosa duktilnosti i žilavosti, [27] slika 22. Žilavost izotermički poboljšanog nodularnog lijeva (posebno za više razine tvrdoće), usporedive su s vrijednostima žilavosti poboljšanog odljevka od žilavog lijeva. Izotermičkim poboljšavanjem se postiže najbolji odnos čvrstoće i duktilnosti, [27]. Osim što ima razmjerno visoku žilavost pri sobnoj temperaturi, izotermički poboljšani nodularni lijev ne pokazuje krhkost ni na temperaturama ispod sobne.

Izotermički poboljšani nodularni lijev ima višu lomnu žilavost za jednaku vlačnu čvrstoću prema klasično poboljšanom stanju i to za sve iznose vlačne čvrstoće, [28,29], slika 24.

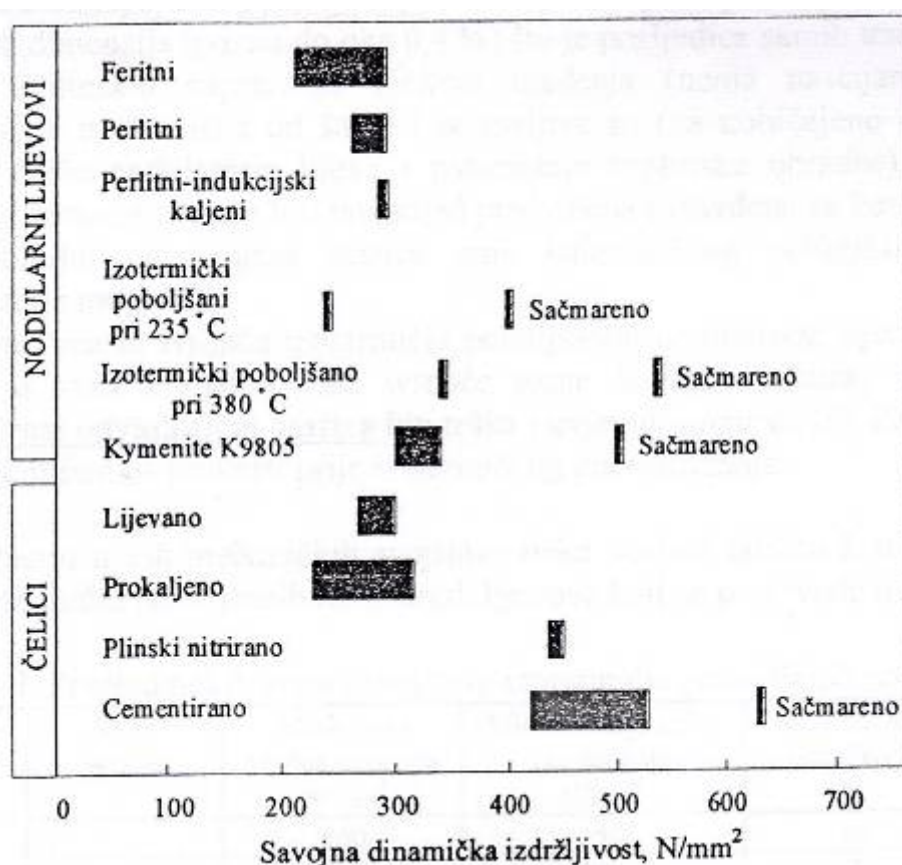


Slika 23 – Usporedba vlačne čvrstoće i istezljivosti za normirane i izotermički poboljšane nodularne lijevove, [30]



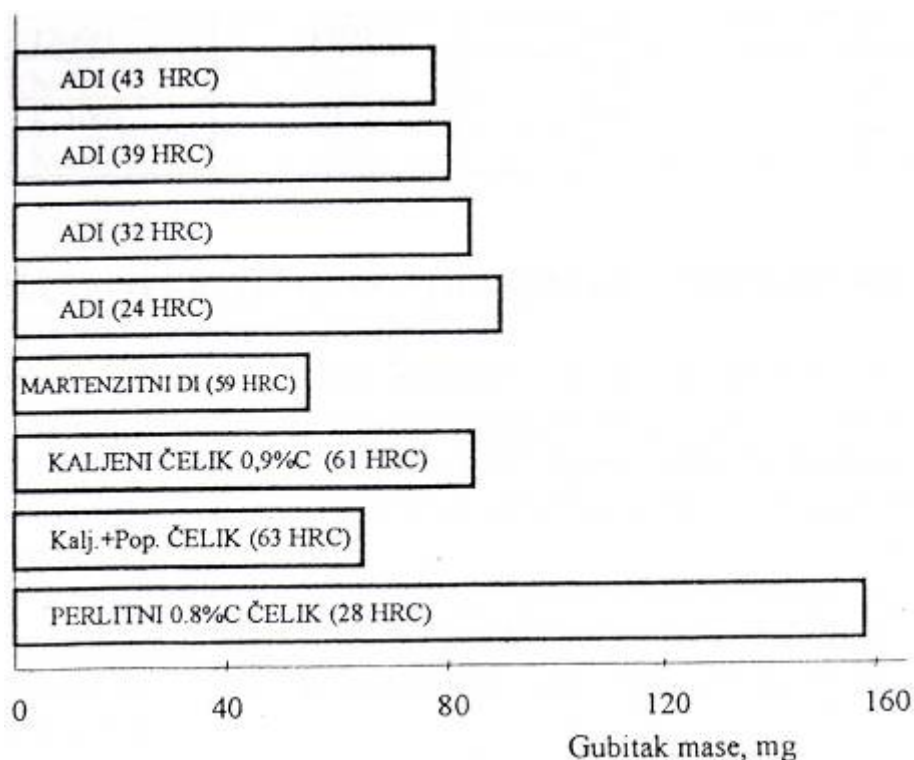
Slika 24 – Usporedba lomne žilavosti normiranih i izotermički poboljšanih nodularnih lijevova, [29]

Izotermičkim poboljšavanjem pri višim temperaturama izotermičke pretvorbe (350 do 400 °C) moguće je postići takve iznose dinamičke izdržljivosti zupčanika koji su usporedivi s onima poboljšanog čelika (u slučaju naknadnog sačmarenja) oni rastu prema iznosima cementiranih čeličnih zupčanika, [31] slika 25. Viši udjel zaostalog austenita utječe na povišenje dinamičke izdržljivosti jer se naknadnim sačmarenjem pretvara u martenzit te nastaju zaostala tlačna naprezanja u površinskom sloju odljevka (povoljno!).



Slika 25 – Savojna dinamička izdržljivost korijena zuba zupčanika izrađenih od različitih materijala i različito toplinski obrađenih, [31]

U pogledu triboloških svojstava izotermički poboljšani nodularni lijev pokazuje dobru otpornost na trošenje, slika 26. Prema rezultatima ispitivanja (uređajem suhi pijesak – gumeni kotač) ustanovljeno je da na početku dolazi do znatnijeg trošenja izotermički poboljšanog nodularnog lijeva (od npr. cementiranog čelika), ali nakon nekog vremena daljnje je trošenje zanemarivo, [32].



Slika 26 – Gubitak mase nekoliko različitih izotermički poboljšanih nodularnih lijevova i abrazijski otpornih čelika, [33]

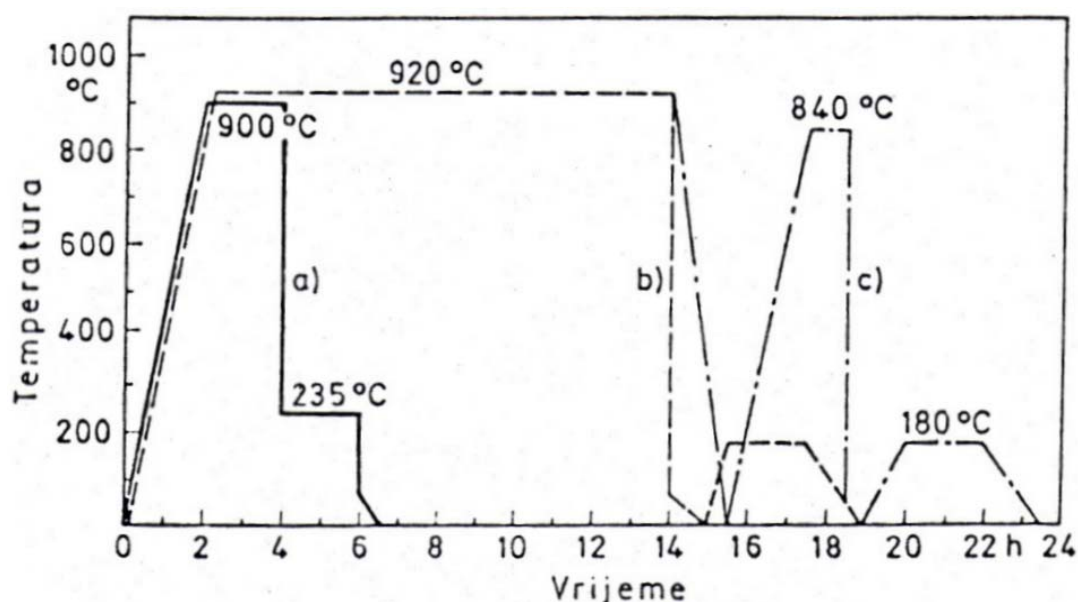
U pogledu nastupajućih deformacija izotermičkim poboljšavanjem se postižu razmjerno male promjene dimenzija (porast oko 0,4%) što je posljedica samih transformacijskih zbivanja i manjih toplinskih naprezanja tijekom hlađenja (nema nastajanja martenzita), [32,34]. Deformacije nisu ovisne od šarže i ponovljive su. Upravo zbog toga promjena dimenzija može biti unaprijed predviđena i utvrđena za konkretni odljevak pa se dio može obraditi odvajanjem čestica prije izotermičkog poboljšavanja (povoljnije).

Razmjerno visoka tvrdoća izotermički poboljšanog nodularnog lijeva (od 30 do 48 HRC), a imajući u vidu znatno veće tvrdoće željezne matrice, ukazuju da će njegova obradivost odvajanjem čestica biti teška i uvjetno moguća, [32]. Zato se preporuča obradu odvajanjem čestica provesti prije izotermičkog poboljšavanja.

3.3.3. PRIMJENA IZOTERMIČKI POBOLJŠANOG NODULARNOG LIJEVA

Zbog dobrih mehaničkih i ostalih tehnoloških svojstava izotermički poboljšani nodularni lijev se danas u svijetu primjenjuje u izradi raznih dijelova koji su u radu izloženi kompleksnim opterećenjima. U slučaju visoko dinamički opterećenih dijelova izotermički poboljšani nodularni lijev zamjenjuje otkovke, valjane čelične profile i čelične odljevke čime se postižu značajne uštede i povisuje produktivnost.

Uspoređujući količinu energije, samim time i troškove izrade jednog te istog dijela ako je izrađen od izotermički poboljšanog nodularnog lijeva prema izradi od čelika ili čeličnog otkovka s odgovarajućom toplinskom obradom (bilo poboljšavanjem ili cementiranjem – slučaj zupčanika) postižu se sljedeće uštede, slika 27.



Slika 27 – Usporedba toplinske obrade, tj. potrošnje energije, prilikom proizvodnje zupčanika izotermičkim poboljšavanjem i klasičnim poboljšavanjem ili cementiranjem, [35]

Od izotermički poboljšanog nodularnog lijeva izrađuju se zupčanici za pogon osovina osobnih vozila i za planetarni prijenos, oslonci opruga u podvozju kamiona, kotači tramvaja i vagona, valjci u valjaonicama, radilice diesel motora, papuče gusjeničara, viljuške mjenjača itd.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

Za eksperimentalno određivanje otpornosti na erozijsko trošenje postoji niz uređaja i metoda. U ovom ispitivanju otpornosti na erozijsko trošenje korišten je uređaj za sačmarenje laboratorija za tribologiju Fakulteta strojarstva i srodogradnje. Uređaj za sačmarenje se koristi za mehaničku obradu površine materijala, u cilju uklanjanja nečistoća, ostataka boja i lakova, itd. Isto tako, može se koristiti u istraživačke svrhe, u cilju ispitivanja otpornosti na trošenje površine materijala. Sačmariti se može česticama različite veličine i oblika.

U ovom radu ispitana je otpornost na erozijsko trošenje nodularnog lijeva koji je izotermički poboljšan u laboratoriju za toplinsku obradbu FSB-a. Temperatura austenitizacije je iznosila 900 °C u trajanju od 90 min, temperatura izotermičke pretvorbe je iznosila 400 °C u trajanju od 60 minuta.

Ovi postupci su izvedeni u svrhu ispitivanja i uspoređivanja utjecaja kuta upada abraziva, tj. erozijskih čestica, te njihove veličine i oblika na gubitak mase, tj. na intenzitet erozijskog trošenja izotermički poboljšanog nodularnog lijeva. Priprema i ispitivanje uzoraka provedena je u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Uzorci su prije provođenja ispitivanja označeni odgovarajućim oznakama da bi ih se znalo naknadno razlikovati. Uzorci su označeni na slijedeći način: A, L, Z, P, X, E, 3, 8 i 5.

4.1. KEMIJSKA ANALIZA UZORAKA

Kemijski sastav materijala određuje se kemijskom analizom. S obzirom na to što se želi odrediti analiza se može podijeliti na kvalitativnu i kvantitativnu analizu. Kvalitativnom analizom određujemo samo prisutnosti pojedinih elemenata, dok kvantitativnom analizom određujemo njihov udio, odnosno koncentraciju.

Za uzorak izotermički poboljšanog nodularnog lijeva koji je izrezan iz ploče napravljena je kvantitativna analiza kemijskog sastava. Analiza je napravljena u Laboratoriju za analizu metala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Dobiveni su sljedeći rezultati:

Tablica III – Analiza kemijskog sastava uzorka izotermički poboljšanog nodularnog lijeva

Oznaka uzorka	%								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo	Mg
Izotermički poboljšani nodularni ljev	2,34	2,72	0,72	0,054	0,011	1,14	0,095	0,016	0,033

Kemijska analiza obavljena je spektrometrijskom metodom na uređaju SPECTRUMAT-750 GDS Leco.



Slika 28 – Spectrumat - 750 GDS Leco

Ovaj uređaj radi na principu optičke emisijske spektrometrije. Ispitivani uzorak predstavlja katodu u uređaju. Njegovi atomi pobuđuju se ioniziranim argonom. Pri prijelazu iz stanja više energije u stanje niže energije atomi ispitivanog uzorka oslobađaju energiju u obliku svijetla koje na fotomultiplikatoru pretvara u napon. Napon se očitava na ekranu. Postupak pobuđivanja atoma ispitivanog uzorka odvija se u vakuumu. Fotomultiplikator ima mogućnost analize dvadeset dva različita elementa. Prilikom određivanja udjela pojedinog elementa potrebno je provesti kalibraciju uređaja referentnim materijalima ili certificiranim referentnim materijalima kojima je poznat kemijski sastav. Kalibriranje se provodi s najmanje pet etalona. Da bi se na ovom uređaju obavila analiza, uzorak mora biti:

- električki vodljiv
- planparalelan
- minimalnih dimenzija $17 \times 17 \times 17$ mm

Prije početka same analize obavlja se predspaljivanje uzorka kako bi se uzorak očistio od nečistoća.

4.2. METALOGRAFSKO ISPITIVANJE UZORAKA

Materijalografija je područje znanosti o materijalima unutar kojeg se stručnjaci bave analizom i boljim razumijevanjem strukture materijala, te razvojem i primjenom tehnika i postupaka izrade uzoraka za analizu.

Osnovni zadatak materijalografije je da se pri poznatom kemijskom sastavu i iz izgleda mikro i makrostrukture odrede okvirna svojstva materijala. Primjena materijalografije je i u području kontrole proizvodnje, kao i pri utvrđivanju grešaka u materijalu i njihovih uzroka.

Jasno je da postoje određena ograničenja materijalografije te da ne treba od analize mikro i makrostrukture očekivati previše.

Postoji granica razaznavanja pojedinih konstituenata ili faza uslijed njihove vrlo male količine, ali i dijelom što se nalaze rastvoreni u krutoj otopini. Ovo ograničenje materijalografije danas se sve više gubi primjenom elektronske mikroskopije. Najveći problem analize mikrostrukture leži u subjektivnoj i vrlo često kvalitativnoj ocjeni analize. To znači da su rezultati analize ovisni o stručnjaku koji ih provodi (da li je iskusen, umoran...), a ti rezultati su vrlo često kvalitativni. Danas je veliki napredak učinjen na području kvantitativne materijalografije primjenom automatske analize slike. Za uzorak iz nodularnog lijeva koji je izrezan iz ploče je napravljena materijalogrfska analiza. Analiza je napravljena u Labaratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

4.2.1. PRIPREMA METALOGRAFSKIH UZORKA

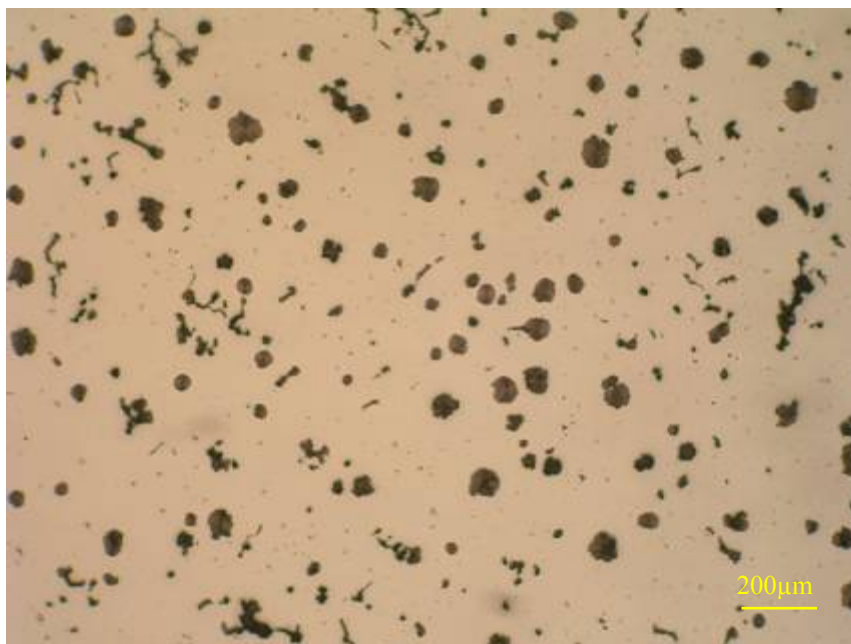
Osnovni uvjet za uspješnu analizu strukture materijala i ispravne rezultate je da analizirani uzorak bude reprezentativan i dobro pripremljen. Postupak analize materijala podijeljen je u šest skupina:

- a) izdvajanje uzorka
- b) zalijevanje uzorka u masu (nije uvijek potrebno)
- c) brušenje
- d) poliranje
- e) nagrivanje
- f) fotografiranje

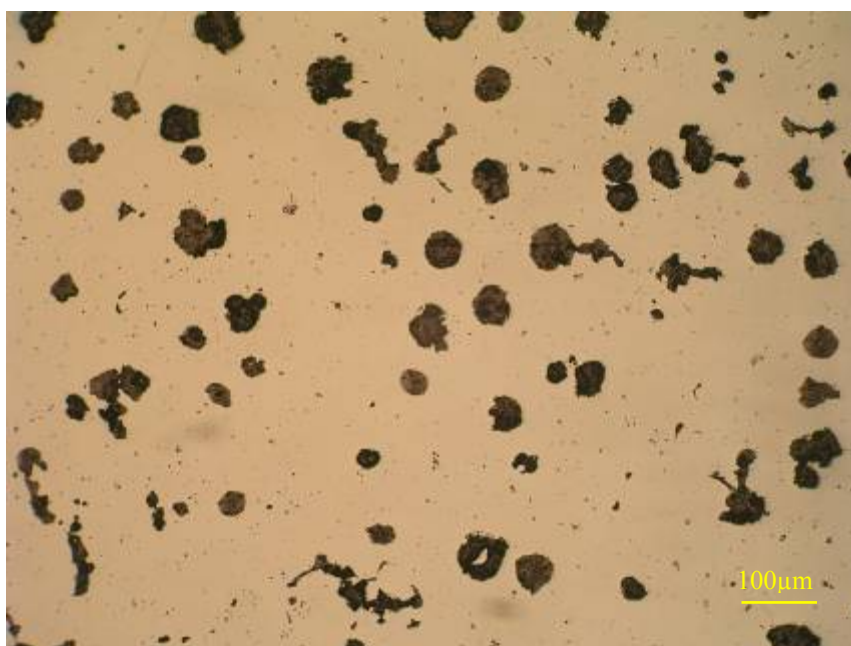
Najčešće je potrebno uočiti pojedine strukturne konstituente ili faze vidljivima. To se postiže izlaganjem tih konstituenata različitim kemikalijama. Ovisno o tipu kristala, sastavu, kemijskoj postojanosti, kristalnoj orijentaciji, različiti konstituenti različito reagiraju na kiseline. Stoga se koristi veliki broj kiselina i njihovih otopina koje nagrize samo one strukturne faze koje želimo analizirati. Uz koncentraciju kiselina, parametri koji utječu na proces nagrivanja su temperatura i vrijeme nagrivanja. U ovom slučaju uzorak je bio nagrivan s 3% otopinom Nital-a. Nital je otopina dušične kiseline u alkoholu.

U nastavku su dane slike ispitivanog uzorka pri povećanjima 100x, 200x, 500x, u poliranom i nagrivenom stanju.

Fotografije su slikane na svjetlosnom mikroskopu Olympus BH-2 povećanje 40x-1000x.

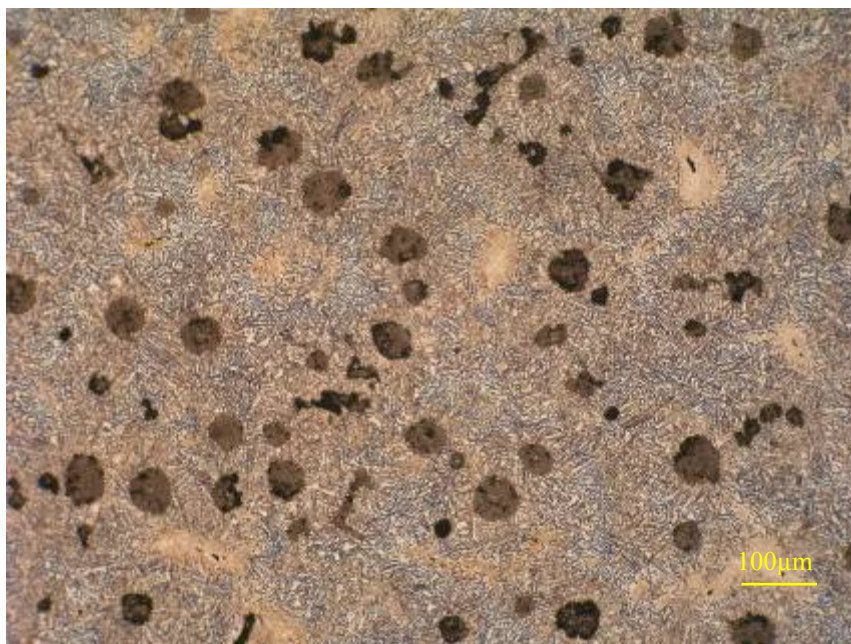


Slika 29 – Mikrostruktura uzorka u poliranom stanju, povećanje 50x



Slika 30 – Mikrostruktura uzorka u poliranom stanju, povećanje 100x

Na slikama 29 i 30 vidljiva je mikrostruktura izotermički poboljšanog nodularnog lijeva s jasno uočljivim grafitnim nodulama u željeznoj matrici.



Slika 31 – Mikrostruktura uzorka u nagriženom stanju, povećanje 100x



Slika 32 – Mikrostruktura uzorka u nagriženom stanju, povećanje 200x



Slika 33 – Mikrostruktura uzorka u nagriženom stanju pri polariziranom svjetlu, povećanje 500x

Na fotografijama uzoraka u nagriženom stanju jasno je vidljiva struktura željezne matrice od igličastog bainita koji okružuje grafitne nodule. Na slikama je vidljivo da je mikrostruktura izotermički poboljšanog nodularnog lijeva kvalitetna, tj. da su nodule fino i ujednačeno dispergirane te da nema prisutnih poroznosti u lijevu. Na slici 31 a naročito na slici 32 (donji desni ugao) vidljivi su i sulfidni uključci u bainitnoj matrici.

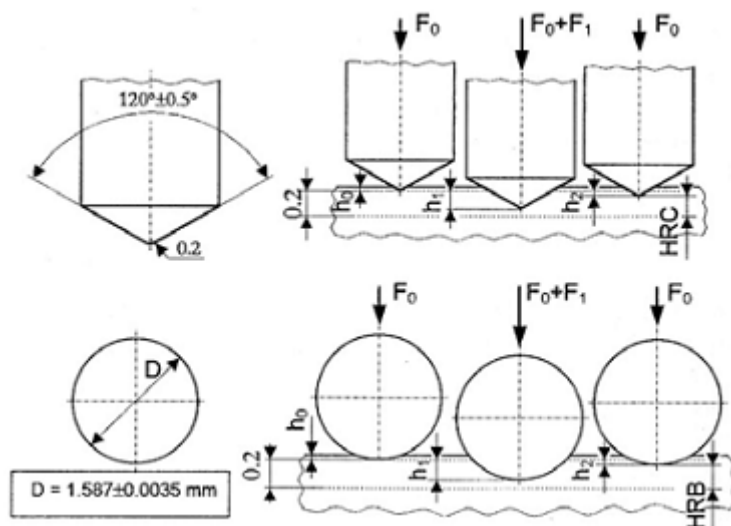
4.3. ISPITIVANJE TVRDOĆE UZORAKA

Kod ove metode se u metal (po ovoj metodi se mjeri tvrdoća samo metalnih materijala) utiskuje dijamantni stožac (engl. "cone" - HRC metoda) ili kuglica od kaljenog čelika (engl. "ball" - HRB metoda).

Penetrator je dijamantni stožac s vršnim kutom od 120° . Kod Rockwellove metode se, za razliku od Brinellove i Vickersove, mjeri dubina prodiranja penetratora, a ne veličina otiska.

Tvrdoća se po HRC metodi mjeri na slijedeći način:

U položaju 1 penetrator se predopterećuje silom $F=100\text{ N}$ što za posljedicu ima prodiranje penetratora ispod površine uzorka. Ta točka je i početni položaj za mjerenje dubine prodiranja. Ukupna moguća dubina prodiranja iznosi $0,2\text{ mm}$ i podijeljena je na 100 dijelova. Jedna podjela iznosi prema tome $0,002\text{ mm}$, i predstavlja jedan stupanj tvrdoće po HRC metodi. Skala je okrenuta naopako, pa početnom položaju pripada vrijednost 100, a najvećoj mogućoj dubini prodiranja 0. Razlog tomu je činjenica da se manjoj dubini prodiranja (tvrdi materijali) pridružuje veći broj koji karakterizira veću tvrdoću, i obrnuto.



Slika 34 – Shematski prikaz mjerenja tvrdoće po HRC i HRB metodi, [36]

Nakon predopterećenja ($F=98\text{ N}$) slijedi glavno opterećenje ($F=1373\text{ N}$) pa je u položaju 2 penetrator opterećen s ukupno 1471 N .

Taj položaj ne predstavlja tvrdoću po HRC-u jer je penetrator opterećen ukupnom silom (1471 N). Slijedi rasterećenje glavnog opterećenja ($F=1373\text{ N}$), ostaje samo predopterećenje ($F=98\text{ N}$), a penetrator se uslijed elastičnosti materijala vrati u položaj 3.

Ova dubina predstavlja tvrdoću, tj. u ovom položaju se očitava tvrdoća na skali tvrdomjera. Naime, svaki tvrdomjer koji mjeri tvrdoću po Rockwell-ovoj metodi ima mjerni sat čija je skala podijeljena u stupnjevima HRC.

Po HRC metodi gotovo isključivo se mjeri tvrdoća toplinski obrađenih čelika. Zato se metoda najviše koristi u pogonskim uvjetima, u prijemnoj kontroli poluproizvoda, te za praćenje efekata postupka toplinske obrade čelika.

Postupak mjerenja je puno brži nego kod Brinella i Vickersa, no selektivnost metode slabija. Naime, mjerno područje je podijeljeno na 100 jedinica, a mjere se najčešće materijali tvrdoće između 20 i 70 HRC.

Prednosti metode:

- mjerenje je brzo, tvrdoća se očitava na skali tvrdomjera
- nije potrebna brižljiva priprema mjerene površine

Nedostaci metode:

- Slaba selektivnost metode. Čitavo mjerno područje je od 0 do 100 HRC (teoretski) praktički od 20 do 70 HRC. Stoga se ova metoda koristi gotovo samo u pogonima, gotovo isključivo na toplinski obrađenim čelicima. Nepreciznost: $\pm 2\text{ HRC}$.

Tablica IV daje prikaz tvrdoća uzoraka L i A izmjerenih pomoću tvrdomjera VEB WERKSTOFFPRÜFMASCHINEN LIPEZIG laboratorija za mehanička ispitivanja FSB-a.

Tablica IV – Tvrdća uzoraka

Oznaka uzorka	Broj mjerenja	Tvrdća	Srednja tvrdća
L	1.	25,2 HRC	26,38 HRC
	2.	27,2 HRC	
	3.	27,5 HRC	
	4.	26 HRC	
	5.	26 HRC	
A	1.	24 HRC	23,1 HRC
	2.	22 HRC	
	3.	20,5 HRC	
	4.	24,5 HRC	
	5.	24,5 HRC	

Iz rezultata mjerenja tvrdće uzoraka vidljivo je da je ona relativno niska u odnosu na tvrdće izotermički poboljšanih nodularnih lijevova pronađenih u literaturi.

4.4. ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA EROZIJSKO TROŠENJE

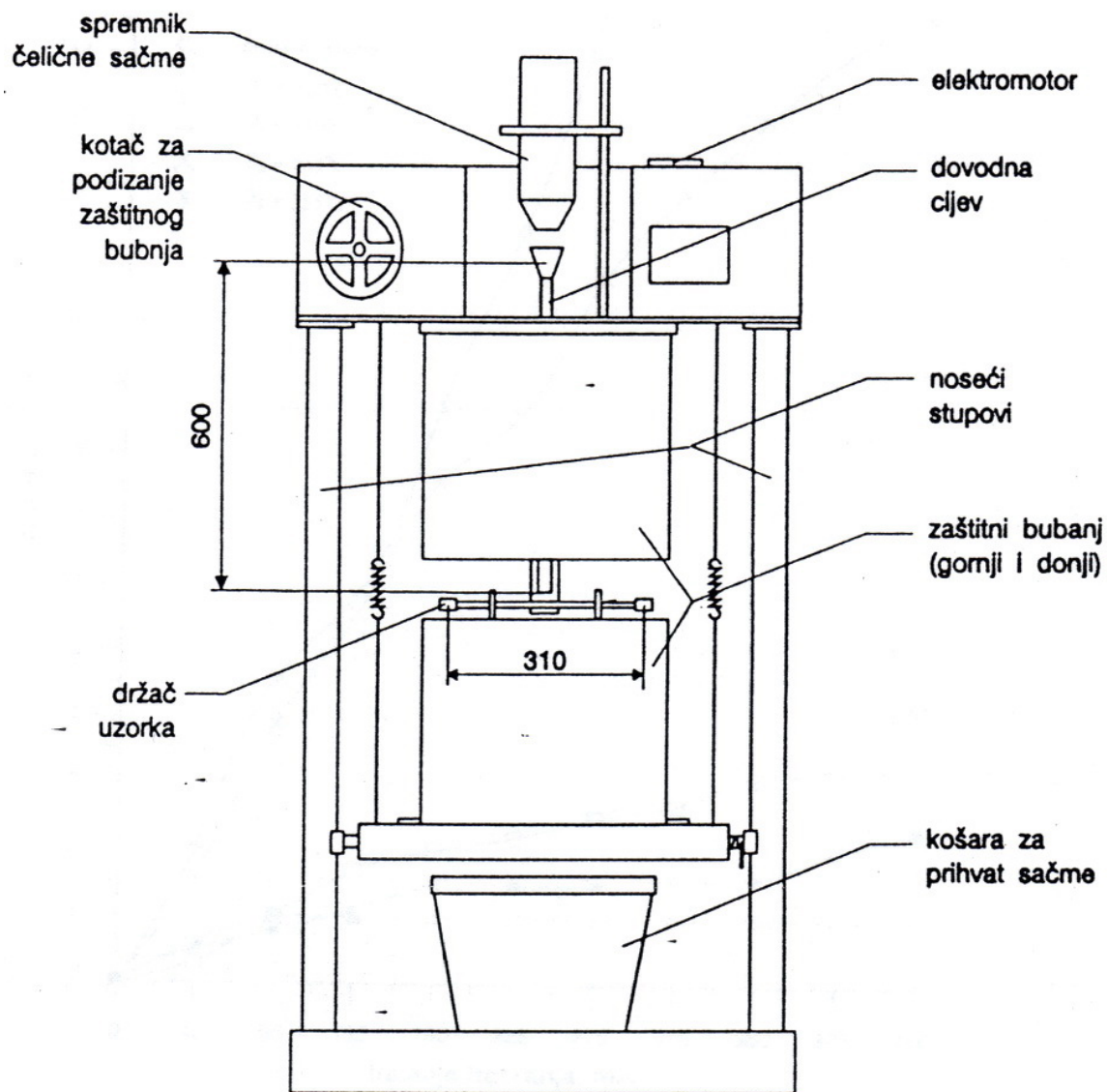
U ovom radu nastoji se utvrditi otpornost na erozijsko trošenje izotermički poboljšanog nodularnog lijeva ovisno o kutu upada i veličini abraziva, tj. erozivnih čestica. Korišten je uređaj za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje Laboratorija za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, prikazan na slici 35.



Slika 35 – Uređaj za ispitivanje otpornosti na eroziju

Prilikom ispitivanja korištene su tri vrste abraziva. Abraziv u ovom tribosustavu su čestice kvarcnog pijeska OTAWA AFS 50/70 veličine oko 300 μm i tvrdoće oko 1200 HV0.03, te dvije vrste čelične sačme srednjeg promjera 1100 μm i 700 μm . Kut upada abraziva je definiran kao nagib između površine materijala i putanje čestica abraziva. U ovom radu svi uzorci ispitivanog materijala izloženi su erodiranju pod šest različitih kutova upada čestica, i to pod: 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°. Tako da je

na svakoj stranici kvadratnog uzorka ispitivan po jedan kut. Shema uređaja za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje prikazana je na slici 36.



Slika 36 – Shema uređaja za ispitivanje otpornosti na eroziju, [37]

4.4.1. PARAMETRI ISPITIVANJA

Svaki uzorak je podvrgnut erozijskom trošenju tako da se u uređaju okreće brzinom 1440 okr/min. Abraziv prolazi (pada pomoću gravitacije) kroz sapnicu promjera 5 mm, udaljenost sapnice od uzorka je 3 mm.

Vrijeme ispitivanja je određeno na 13 minuta i 53 sekunde, što odgovara broju od 20 000 ciklusa, tj. okretaja uređaja.

Ispitni uzorci su dimenzija od otprilike 20x20x20 mm i pričvršćeni su pomoću vijaka na držač uzoraka. Držač uzoraka pričvršćen je na osovinu uređaja i rotira se brzinom od 1440 okr/min pa je brzina vrtnje uzorka:

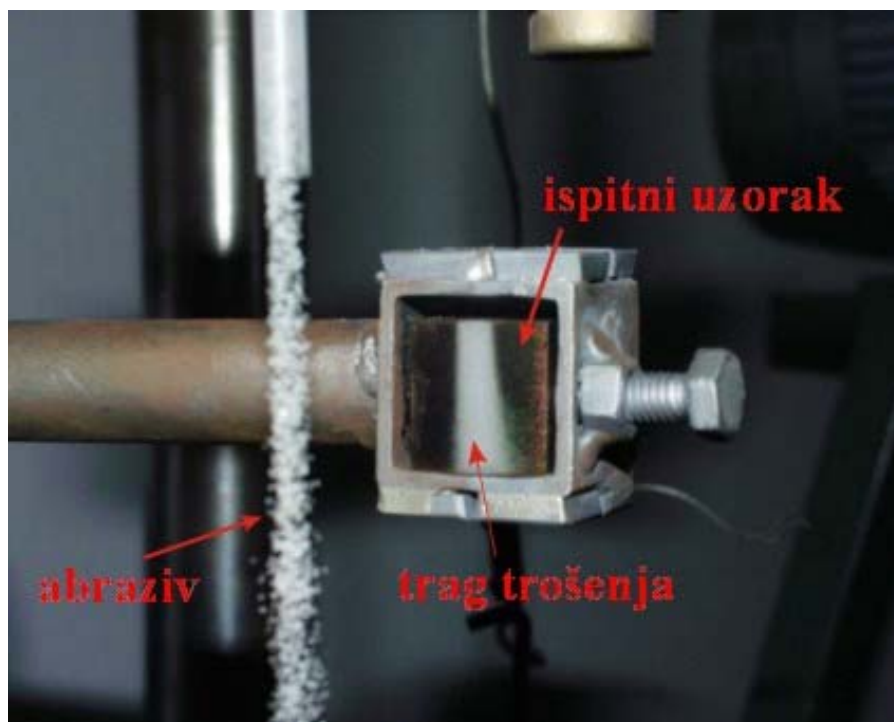
$$v_u = \frac{D\pi n_{okr}}{60} = 24,265 \text{ m/s} \quad (3)$$

Gdje je: D - promjer na kojem su pričvršćeni uzorci ($D=322 \text{ mm}$)

n_{okr} - broj okretaja osovine (držača), okr/min

v_u - brzina vrtnje uzorka, $[m/s]$

Na slici 37 prikazan je držač uzoraka, sam ispitivani uzorak i sapnica iz koje curi abraziv.



Slika 37 – Unutrašnjost uređaja za ispitivanje otpornosti na eroziju

Prema tome ispitni uzorci će udarati u abrazivne čestice brzinom 24,265 m/s. Nakon završetka ispitivanja (erodiranja) svake stranice na pojedinom uzorku, isti su vagani na vagi.

Stupanj erozije se određuje mjerenjem gubitka mase prilikom vaganja nakon erozije svake stranice na pojedinom uzorku. Gubitak mase, tj. razlika u masi ispitnog uzorka prije i poslije, mjerena je pomoću vage METLLER B5C 1000, rezolucije 0,0001g.

Na ovaj način određena je otpornost na erozijsko trošenje izotermički poboljšanog nodularnog lijeva u ovisnosti o vrsti, veličini i kutu upada abraziva.



Slika 38 – Vaga METLLER B5C 1000

4.4.2. REZULTATI ISPITIVANJA

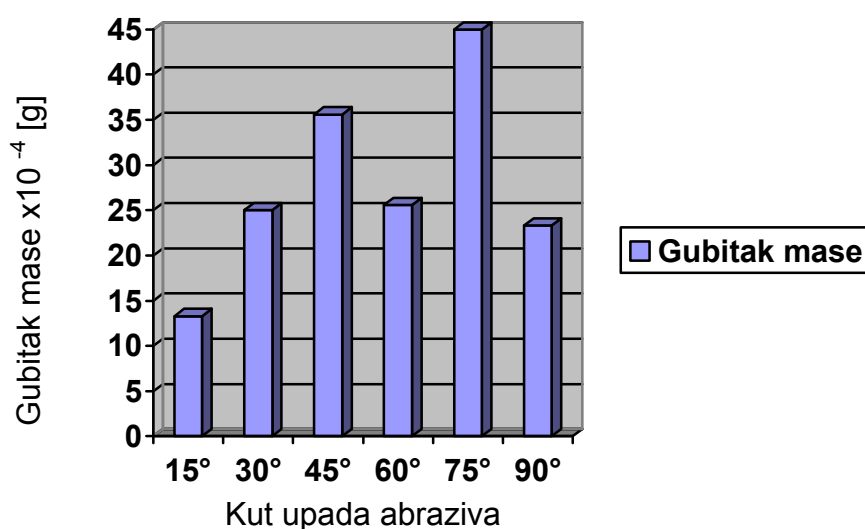
Prvo su ispitivani uzorci L, P, i 8. Abraziv, tj. čestice erozije korištene za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje ovih uzoraka bio je kvarcni pijesak OTAWA 50/70.

U tablici V navedeni su rezultati provedenih ispitivanja, tj. gubitak mase pojedinog uzorka ovisno o kutu upada abraziva.

Tablica V – Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva (kvarcnog pijeska)

Oznaka uzorka	Početna masa, [g]	Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva Δm , [g]						
		90°	75°	60°	45°	30°	15°	Ukupno Δm , [g]
L	37,7215	0,0024	0,0037	0,0017	0,0043	0,0028	0,0014	0,0163
P	36,6016	0,0023	0,0068	0,0027	0,0036	0,0017	0,0014	0,0185
8	35,9233	0,0032	0,0030	0,0033	0,0028	0,0030	0,0012	0,0165
Srednja vrijednost		0,00263	0,0045	0,00256	0,00356	0,0025	0,00133	0,0171

Na slici 39 prikazan je dijagram promjene, tj. gubitka mase uslijed erozijskog trošenja uzorka izotermički poboljšanog nodularnog lijeva kvarcnim pijeskom OTAWA 50/70 pri različitim kutovima upada abraziva.



Slika 39 – Histogram gubitka mase ovisno o kutu upada abraziva (kvarcnog pijeska)

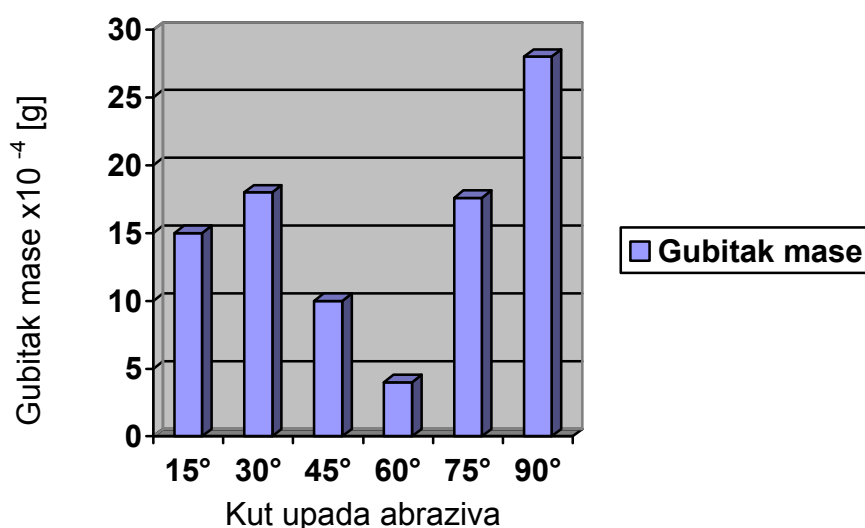
Iz tablice V i histograma na slici 39 vidi se da je izotermički poboljšani nodularni lijev najmanje otporan na eroziju česticama od kvarcnog pijeska, tj. oštrim česticama pri kutu upada od 75°, također se može primijetiti i relativno veliki gubitak mase i kod kuta upada od 45°. Uzorak se pokazao najotpornijim, tj imao je najmanji gubitak mase pri kutu upada čestica od 15°

Uzorci Z, X i 3 su erodirani pomoću čelične sačme promjera 700 μm . U tablici VI navedeni su rezultati provedenih ispitivanja, tj. gubitak mase pojedinog uzorka ovisno o kutu upada abraziva.

Tablica VI – Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva (sitne sačme)

Oznaka uzorka	Početna masa, [g]	Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva Δm , [g]						
		90°	75°	60°	45°	30°	15°	Ukupno Δm , [g]
Z	36,3170	0,0026	0,0017	0,0004	0,0015	0,0012	0,0007	0,0081
X	38,0706	0,0033	0,0017	0,0003	0,0005	0,0027	0,0024	0,0111
3	37,4534	0,0025	0,0019	0,0005	0,0010	0,0015	0,0014	0,0088
Srednja vrijednost		0,0028	0,00176	0,0004	0,0010	0,0018	0,0015	0,00933

Na slici 40 prikazan je dijagram promjene, tj. gubitka mase uslijed erozijskog trošenja uzorka izotermički poboljšanog nodularnog lijeva sačmom promjera 700 μm , tj. sitnijom sačmom pri različitim kutovima upada abraziva.



Slika 40 – Histogram gubitka mase ovisno o kutu upada abraziva (sitne sačme)

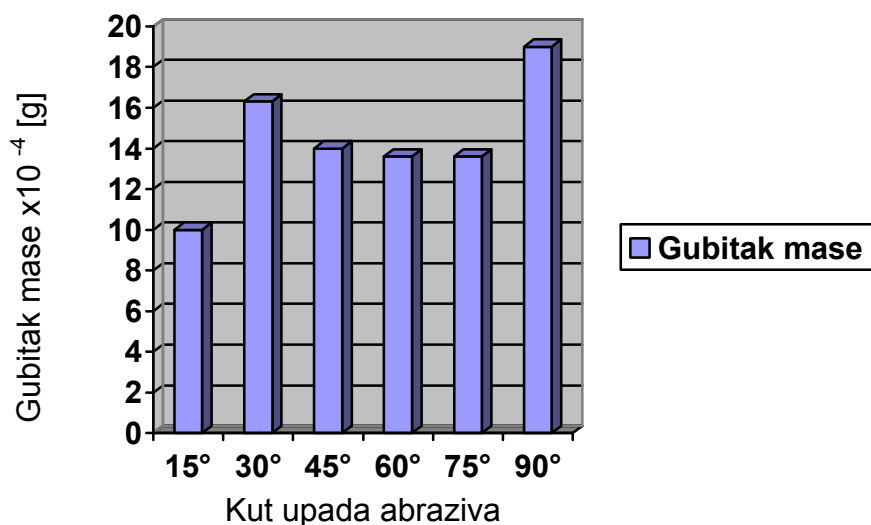
Iz tablice VI i histograma na slici 40 može se vidjeti da izotermički poboljšani nodularni lijev je najmanje otporan na eroziju okruglim abrazivom, tj sačmom promjera 700 μm pri kutu upada abraziva od 90° , dok najveću otpornost pokazuje za kut upada abraziva od 60° .

Uzorci A, E i 5 su ispitivani na otpornost na eroziju česticama pomoću čelične sačme promjera 1100 μm . U tablici VII navedeni su rezultati provedenih ispitivanja, tj. gubitak mase pojedinog uzorka ovisno o kutu upada abraziva.

Tablica VII – Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva (krupne sačme)

Oznaka uzorka	Početna masa, [g]	Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva Δm , [g]						
		90°	75°	60°	45°	30°	15°	Ukupno Δm , [g]
A	37,7205	0,0015	0,0019	0,0013	0,0012	0,0009	0,0013	0,0081
E	36,7933	0,0023	0,0013	0,0013	0,0014	0,0025	0,0009	0,0097
5	37,3934	0,0019	0,0009	0,0015	0,0016	0,0015	0,0008	0,0082
Srednja vrijednost		0,0019	0,00136	0,00136	0,0014	0,00163	0,0010	0,00866

Na slici 41 prikazan je dijagram promjene, tj. gubitka mase uslijed erozijskog trošenja uzorka izotermički poboljšanog nodularnog lijeva sačmom promjera 1100 μm , tj. krupnijom sačmom pri različitim kutevima upada abraziva.



Slika 41 – Histogram gubitka mase ovisno o kutu upada abraziva (krupne sačme)

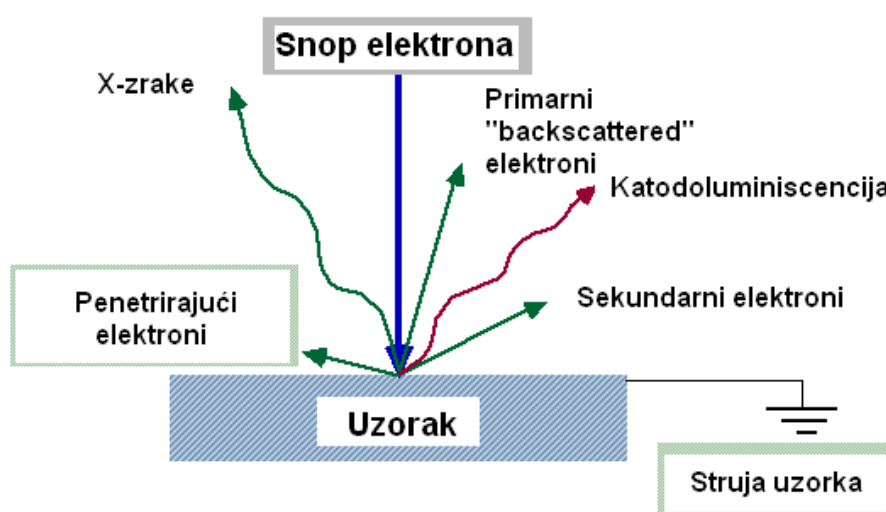
Iz tablice VII i histograma na slici 41 vidi se da je gubitak mase, tj. erozijsko trošenje izotermički poboljšanog nodularnog lijeva krupnijim okruglim abrazivom, tj. sačmom promjera 1100 μm prilično ujednačeno za kutove upada abraziva od 30° do 75°. Malo veći intenzitet trošenja se može primjetiti kod kuta upada od 90°, dok je najbolja otpornost trošenju izmjerena pri kutu upada abraziva od 15°.

Ukupno trošenje uzoraka kvarcnim pijeskom iznosi u prosjeku 17,1 mg što je otprilike duplo više od onog sitnom (prosječno 9,33 mg po uzorku) ili krupnom (prosječno 8,66 mg po uzorku) sačmom. Gledajući ukupan gubitak mase, tj. intenzitet a samim time i otpornost na erozijsko trošenje neovisno o kutu upada abraziva, primjećuje se da je izotermički poboljšani nodularni lijev manje otporan na erozijsko trošenje kvarcnim pjeskom, tj. manjim ali oštrim česticama nego na eroziju sačmom, tj. Većim, ali okruglim česticama.

4.4.3. ANALIZA UZORAKA SKENING ELEKTRONSKIM MIKROSKOPOM

Skening elektronski mikroskop (SEM) je elektronski mikroskop koji omogućava prikaz površine uzorka s velikom rezolucijom. Nadalje, SEM ima mogućnost trodimenzionalnog prikazivanja površine, te mu to svojstvo omogućava veoma veliku primjenu u istraživanju površine i strukture materijala.

U uobičajenim izvedbama elektroni su uslijed topline emitirani od strane volframove katode, te ubrzavaju prema anodi. Postoji izvedba u kojoj su elektroni emitirani električnim poljem. Volfram se koristi jer ima najvišu točku taljenja od svih metala, te je stoga sposoban izdržati veliku toplinu potrebnu za emitiranje elektrona. Elektronski snop, čija je energija obično između nekoliko stotina elektronvolti pa sve do 100 keV, je fokusiran s jednom ili dvije leće u zraku s veoma malom fokusnom točkom od 0.4 nm do 5 nm. Zraka prolazi kroz deflektorske ploče, koje je odbijaju u horizontalnom i vertikalnom smjeru, tako da daje dubinsko područje skeniranja u pravokutnom obliku. Kada zraka primarnih elektrona udari o površinu ispitivanog uzorka, elektroni gube energiju uslijed sudaranja i apsorpcije osnovnog materijala. Samo će tanki sloj materijala apsorbirati elektrone. Kako su površinski slojevi apsorbirali energiju, oni će tada emitirati elektrone i elektromagnetsku radijaciju, koji mogu biti detektirani da bi se dobila slika.



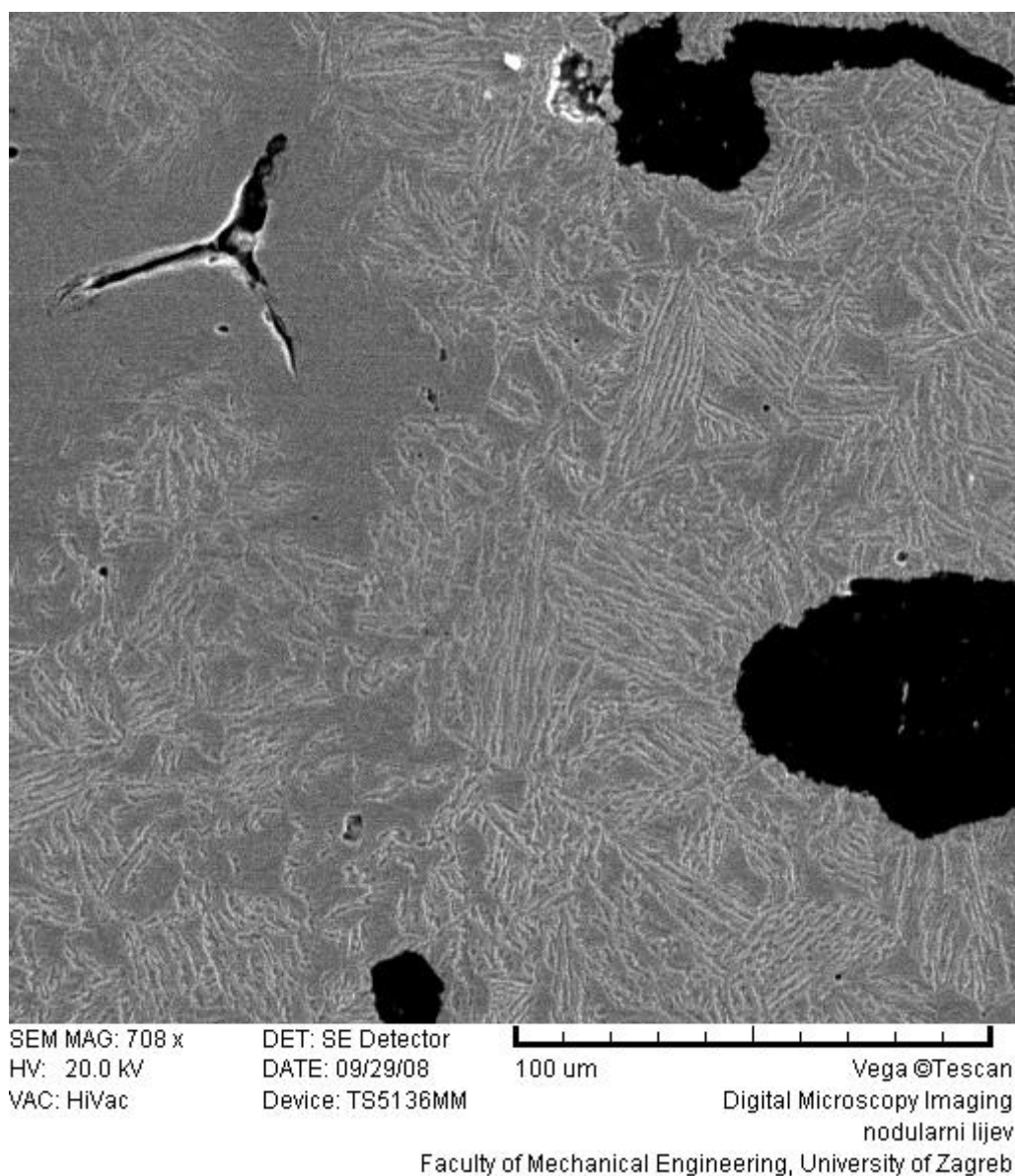
Slika 42 – Princip rada skening elektronskog mikroskopa [15]

Detektor sekundarnih elektrona se može koristiti za dobivanje trodimenzionalne slike, dok detektor “backscattered” elektrona može prikazati kontraste među različitim kemijskim sastavima uzoraka.

Analiza je napravljena u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta, te su dobivene fotografije površina uzoraka. Fotografirana je površina poliranog uzorka izotermički poboljšanog nodularnog lijeva te površina uzorka podvrgnutog ispitivanju otpornosti na erozijsko trošenje, tj. erodiranog uzorka.

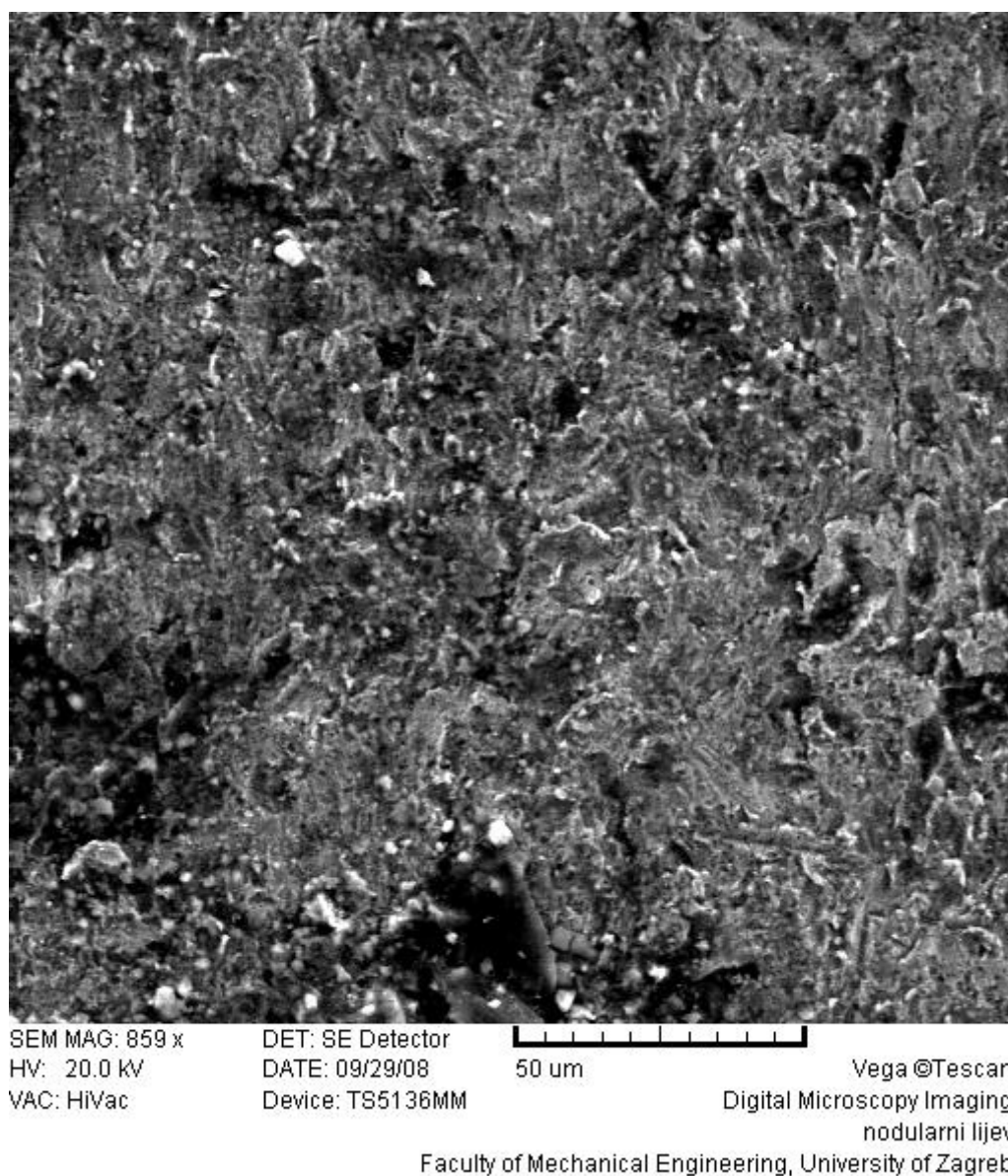


Slika 43 – Skening elektronski mikroskop Oxford Tescan



Slika 44 – Fotografija uzorka u poliranom stanju, povećanje 708x

Na fotografiji snimljenoj pomoću SEM-a vidi se mikrostruktura uzorka u kojoj se raspoznaje listićava bainitna struktura koja okružuje grafitne nodule.



Slika 45 – Fotografija uzorka ispitivanog na otpornost erozijskom trošenju, povećanje 859x

Na slici 45 vidi se izgled površine uzorka koji je ispitivan na otpornost na erozijsko trošenje pomoću kvarcnog pijeska. Površina ispitivanog uzorka je oštećena uslijed mikrobrazdanja i mikronaprskica izazvanih udarom čestica erozije u nju. Na slici se vide i grafitne nodule koje su se deformirale pod udarnim djelovanjem erozivnih čestica (crne mrlje).

4.5. STATISTIČKA OBRADA REZULTATA

4.5.1. RAZVOJ MODELA

Provedeno je ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje krutim česticama izotermički poboljšanog nodularnog lijeva ovisno o obliku, veličini i kutu upada abraziva, tj. čestica erozije. Prilikom ispitivanja korištene su tri vrste erozijskih čestica: kvarcni pijesak OTAWA 50/70, tj. manje i oštre čestice i čelična sačma veličine 700 μm i 1100 μm , tj. veće i okrugle čestice erozije.

Cilj je dobiti uvid u ponašanje izotermički poboljšanog nodularnog lijeva prilikom erozijskog trošenja krutim česticama ovisno o njihovom kutu upada i veličini.

Tako je moguće predvidjeti ponašanje izotermički poboljšanog nodularnog lijeva izloženog erozijskom trošenju i odrediti regresijska ovisnost intenziteta trošenja materijala o kutu upada i veličini abraziva.

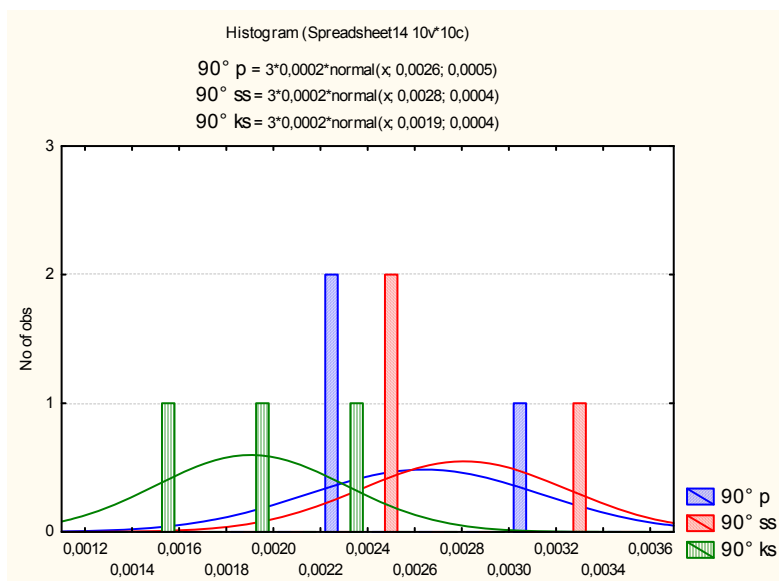
U tablicama V, VI i VII su prikazani rezultati ispitivanja svih devet uzoraka i njihove otpornosti erozijskom trošenju ovisno o kutu upada abraziva, tj. čestica trošenja. Podaci su obrađeni računalnim alatom Statistica.

Prvo su određeni osnovni statistički podaci, gdje oznake znače:

- p – erodiranje pijeskom
- ss – erodiranje sitnom sačmom, tj. sačmom promjera 700 μm
- ks – erodiranje krupnom sačmom, tj. sačmom promjera 1100 μm

Tablica VIII – Osnovni statistički podaci za ispitivanje erozije pod kutom od 90°

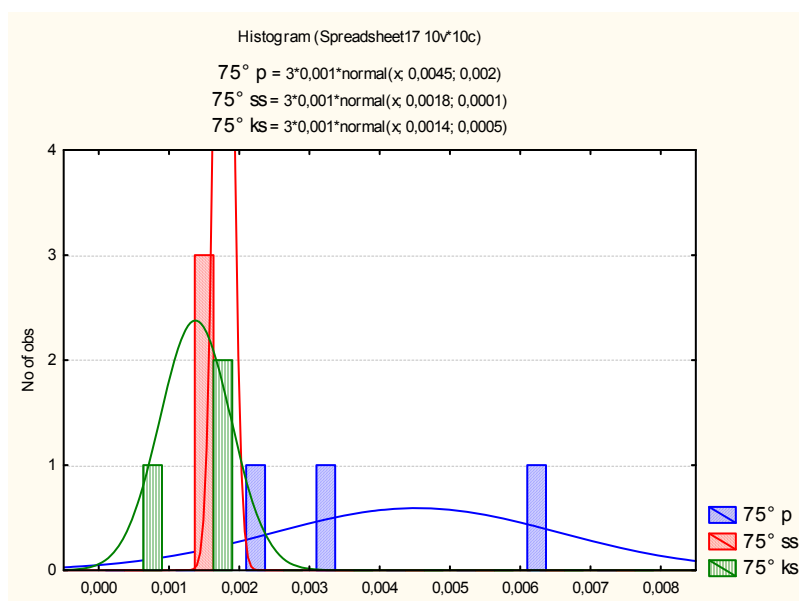
Descriptive Statistics (Osnovni podaci)					
	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
90° p	3	0,002633	0,002300	0,003200	0,000493
90° ss	3	0,002800	0,002500	0,003300	0,000436
90° ks	3	0,001900	0,001500	0,002300	0,000400



Slika 46 – Histogram za uzorke ispitivane pod kutom upada abraziva od 90°

Tablica IX – Osnovni statistički podaci za ispitivanje erozije pod kutom od 75°

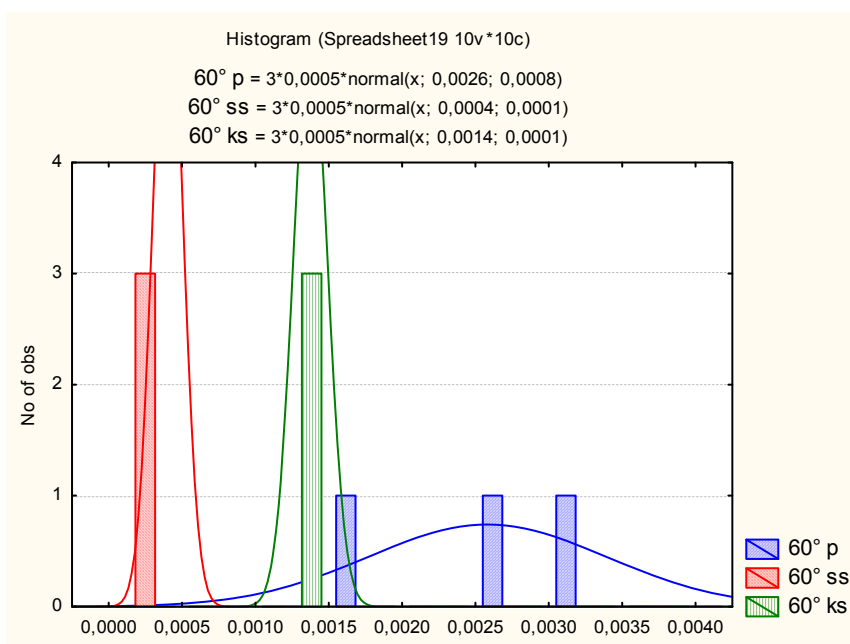
Descriptive Statistics (Osnovni podaci)					
	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
75° p	3	0,004500	0,003000	0,006800	0,002022
75° ss	3	0,001767	0,001700	0,001900	0,000115
75° ks	3	0,001367	0,000900	0,001900	0,000503



Slika 47 – Histogram za uzorke ispitivane pod kutom upada abraziva od 75°

Tablica X – Osnovni statistički podaci za ispitivanje erozije pod kutom od 60°

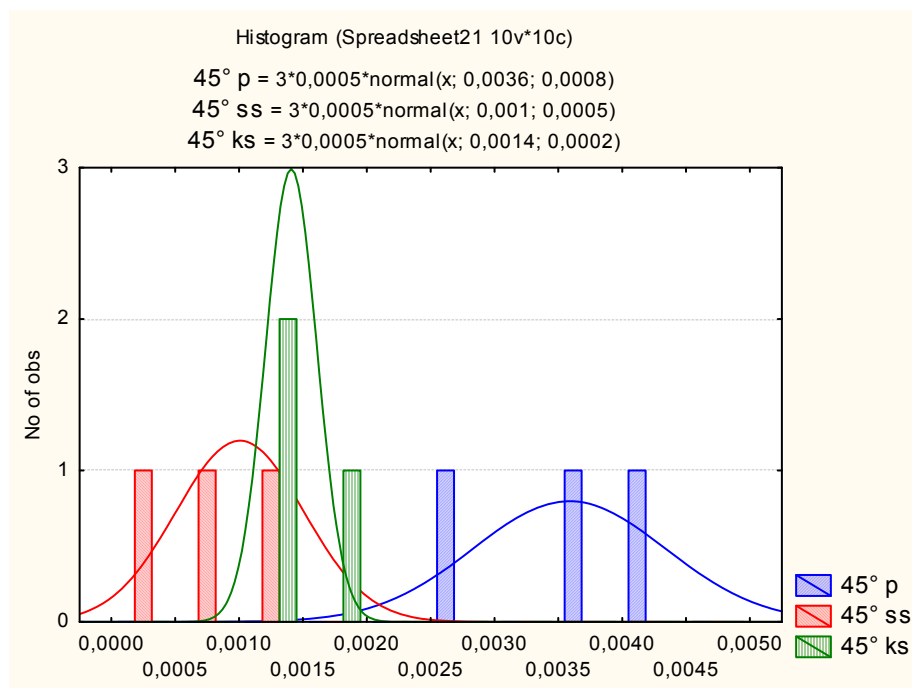
Descriptive Statistics (Osnovni podaci)					
	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
60° p	3	0,002567	0,001700	0,003300	0,000808
60° ss	3	0,000400	0,000300	0,000500	0,000100
60° ks	3	0,001367	0,001300	0,001500	0,000115



Slika 48 – Histogram za uzorke ispitivane pod kutom upada abraziva od 60°

Tablica XI – Osnovni statistički podaci za ispitivanje erozije pod kutom od 45°

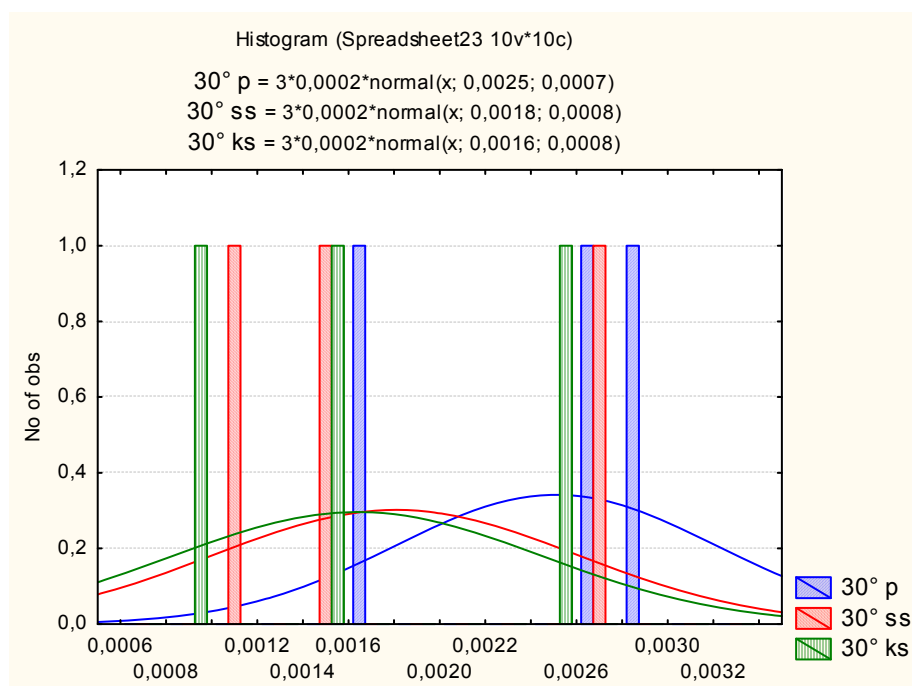
Descriptive Statistics (Osnovni podaci)					
	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
45° p	3	0,003567	0,002800	0,004300	0,000751
45° ss	3	0,001000	0,000500	0,001500	0,000500
45° ks	3	0,001400	0,001200	0,001600	0,000200



Slika 49 – Histogram za uzorke ispitivane pod kutom upada abraziva od 45°

Tablica XII – Osnovni statistički podaci za ispitivanje erozije pod kutom od 30°

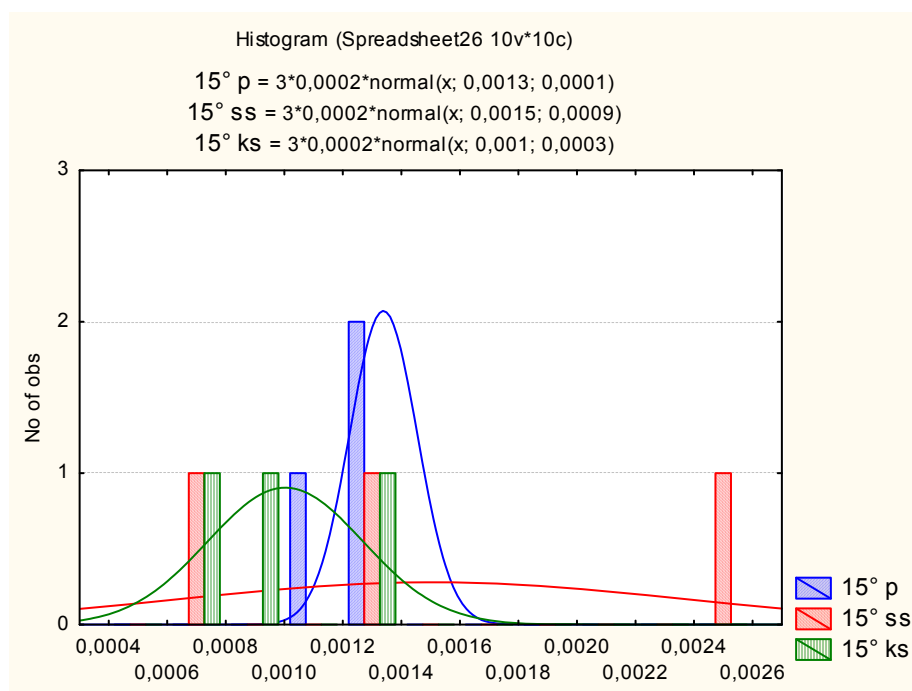
Descriptive Statistics (Osnovni podaci)					
	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
30° p	3	0,002500	0,001700	0,003000	0,000700
30° ss	3	0,001800	0,001200	0,002700	0,000794
30° ks	3	0,001633	0,000900	0,002500	0,000808



Slika 50 – Histogram za uzorke ispitivane pod kutom upada abraziva od 30°

Tablica XIII – Osnovni statistički podaci za ispitivanje erozije pod kutom od 15°

Descriptive Statistics (Osnovni podaci)					
	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
15° p	3	0,001333	0,001200	0,001400	0,000115
15° ss	3	0,001500	0,000700	0,002400	0,000854
15° ks	3	0,001000	0,000800	0,001300	0,000265



Slika 51 – Histogram za uzorke ispitivane pod kutom upada abraziva od 15°

Na slikama 46 do 51 te tablicama VIII do XIII pokazani su osnovni podaci za pojedine kutove upada abraziva zajedno s njihovom vrstom te su dani odgovarajući histogrami. Iz priloženih podataka i histograma vidljivo je veliko rasipanje podataka. Nije moguće provesti linearnu regresijsku analizu zbog premale količine podataka pa samim time izvesti neku zakonitost ovisnosti potrošnje, tj. gubitka materijala o kutu upada ili vrsti abraziva. Da bi se provela linearna regresijska analiza bilo bi potrebno napraviti ispitivanja na većem broju uzoraka.

Zbog same prirode podataka, tj. činjenice da postoji samo devet uzoraka a tri vrste abraziva i šest kutova upada može se napraviti samo analiza varijance. Analizirana je ovisnost gubitka mase u odnosu na tip abraziva i gubitka mase u odnosu na kut upada abraziva.

Iz ovih razloga podatke se moralo grupirati na slijedeći način, tablica XIV, nakon čega se izvela analiza varijance za sva mjerenja.

Tablica XIV – Podaci gubitka mase, kuta upada i vrste abraziva

	gubitak mase	kut	abraziv
1	0,0024	90°	p
2	0,0023	90°	p
3	0,0032	90°	p
4	0,0026	90°	ss
5	0,0033	90°	ss
6	0,0025	90°	ss
7	0,0015	90°	ks
8	0,0023	90°	ks
9	0,0019	90°	ks
10	0,0037	75°	p
11	0,0068	75°	p
12	0,003	75°	p
13	0,0017	75°	ss
14	0,0017	75°	ss
15	0,0019	75°	ss
16	0,0019	75°	ks
17	0,0013	75°	ks
18	0,0009	75°	ks
19	0,0017	60°	p
20	0,0027	60°	p
21	0,0033	60°	p
22	0,0004	60°	ss
23	0,0003	60°	ss
24	0,0005	60°	ss
25	0,0013	60°	ks
26	0,0013	60°	ks
27	0,0015	60°	ks
28	0,0043	45°	p
29	0,0036	45°	p
30	0,0028	45°	p

31	0,0015	45°	ss
32	0,0005	45°	ss
33	0,001	45°	ss
34	0,0012	45°	ks
35	0,0014	45°	ks
36	0,0016	45°	ks
37	0,0028	30°	p
38	0,0017	30°	p
39	0,003	30°	p
40	0,0012	30°	ss
41	0,0027	30°	ss
42	0,0015	30°	ss
43	0,0009	30°	ks
44	0,0025	30°	ks
45	0,0015	30°	ks
46	0,0014	15°	p
47	0,0014	15°	p
48	0,0012	15°	p
49	0,0007	15°	ss
50	0,0024	15°	ss
51	0,0014	15°	ss
52	0,0013	15°	ks
53	0,0009	15°	ks
54	0,0008	15°	ks

Tablice XV i XVI prikazuju intervale povjerenja za gubitak mase po kutu odnosno vrsti abraziva.

Tablica XV – Intervali povjerenja za gubitak mase s obzirom na kut upada abraziva

kut; Weighted Means (Spreadsheet1) Current effect: F(5, 46)=3,0944, p=,01723 Effective hypothesis decomposition					
	gubitak mase - Mean	gubitak mase - Std.Err.	gubitak mase - -95,00%	gubitak mase - +95,00%	N
1	0,002444	0,000189	0,002009	0,002879	9
2	0,002544	0,000603	0,001154	0,003934	9
3	0,001444	0,000342	0,000656	0,002233	9
4	0,001989	0,000427	0,001003	0,002974	9
5	0,001978	0,000259	0,001381	0,002574	9
6	0,001278	0,000167	0,000892	0,001664	9

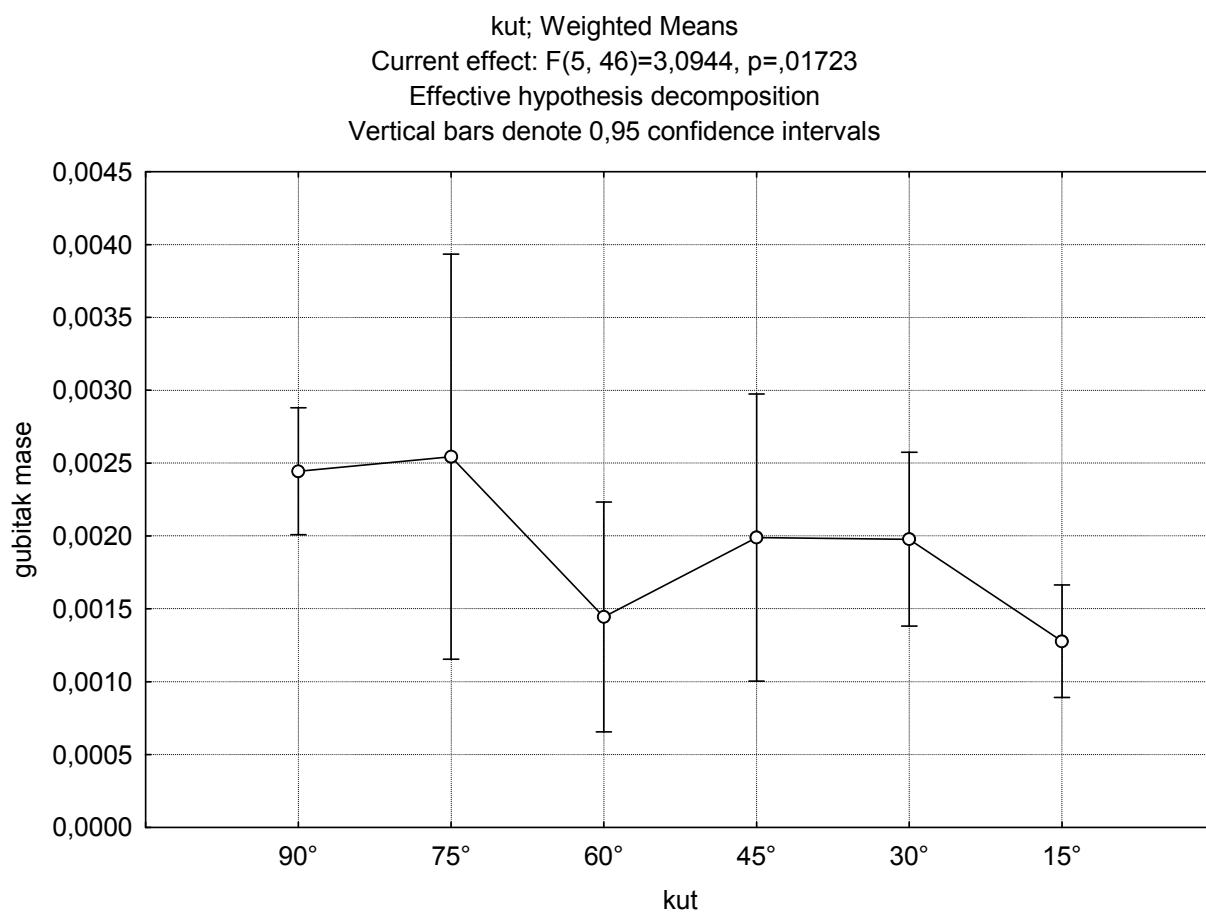
Tablica XVI – intervali povjerenja za gubitak mase s obzirom na vrstu abraziva

abraziv; Weighted Means (tablica)						
Current effect: F(2, 46)=14,555, p=,00001						
Effective hypothesis decomposition						
	abraziv	gubitak mase - Mean	gubitak mase - Std.Err.	gubitak mase – -95,00%	gubitak mase – +95,00%	N
1	p	0,002850	0,000310	0,002195	0,003505	18
2	ss	0,001544	0,000210	0,001101	0,001988	18
3	ks	0,001444	0,000111	0,001211	0,001678	18

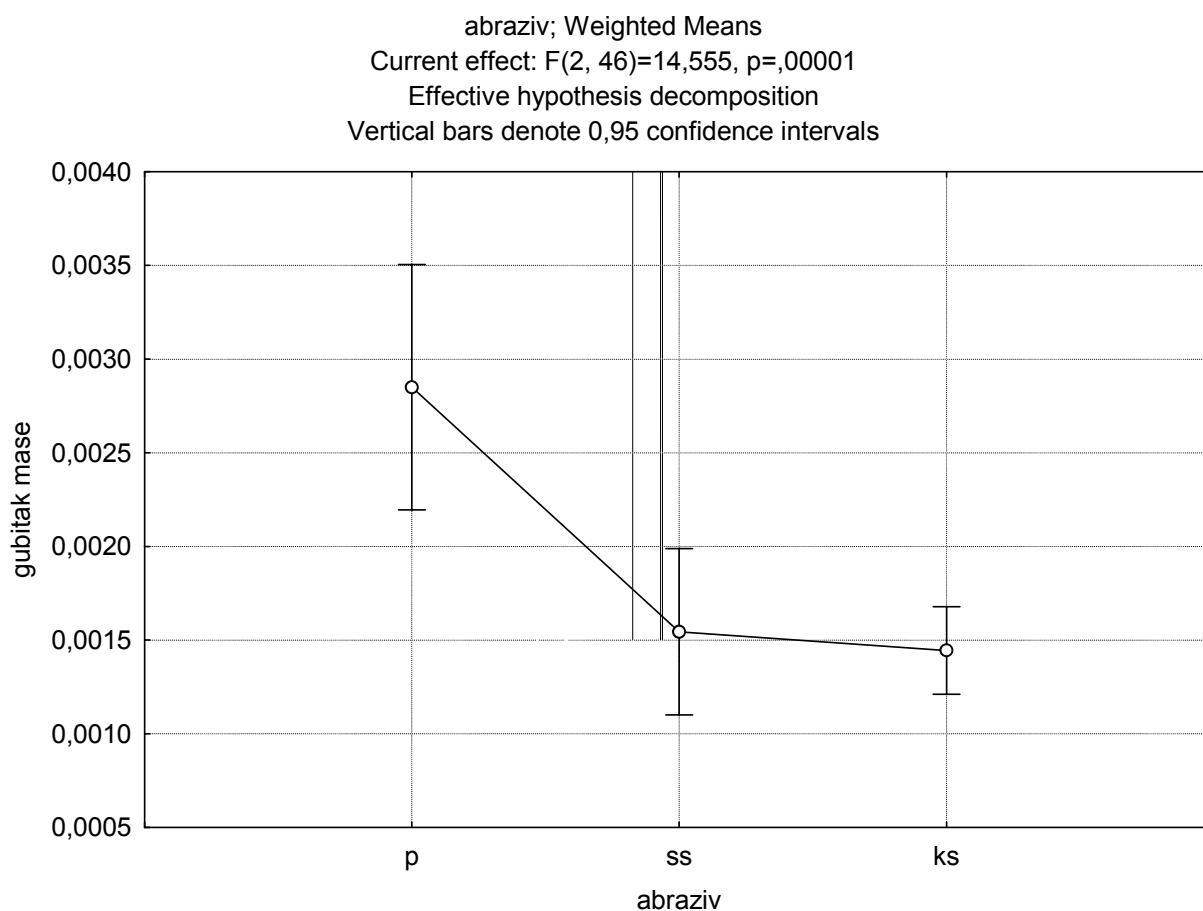
Nakon što su određeni intervali povjerenja za gubitak mase s obzirom na kut ili na vrstu abraziva provedena je analiza varijance. Dobiveni su slijedeći rezultati, tablica XVII.

Tablica XVII – Analiza varijance gubitka mase u odnosu na kut upada abraziva i vrstu abraziva

Univariate Tests of Significance for gubitak mase (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
	SS	Degr. of - Freedom	MS	F	p
Intercept	0,000205	1	0,000205	268,9500	0,000000
kut	0,000012	5	0,000002	3,0944	0,017233
abraziv	0,000022	2	0,000011	14,5551	0,000013
Error	0,000035	46	0,000001		



Slika 52 – Box whisker plot gubitaka mase s obzirom na kut upada abraziva



Slika 53 – Box whisker plot gubitaka mase s obzirom na vrstu abraziva

Na slikama 52 i 53 vide se gubici mase s obzirom na kut upada i vrstu abraziva, također je vidljivo i veliko rasipanje podataka (pogotovo za kut od 75° i pijesak). Na slikama se vidi da je najmanji gubitak mase za kuteve upada abraziva od 15° i nešto više za 60° , također se vidi da kvarcni pijesak u znatno većoj mjeri erodira izotermički poboljšani nodularni lijev od čelične sačme.

Analizom varijance utvrđeno je da postoji signifikantna, tj. značajna razlika u podacima gubitka mase s obzirom na vrstu i s obzirom na kut upada abraziva. To znači da nije moguće izvesti zaključak ili neku zakonitost kako će se izotermički poboljšani erozijski trošiti prilikom udara čestica pod određenim kutom ili za pojedinu vrstu čestica. Zaključak je da erozijsko trošenje izotermički poboljšanog nodularnog lijeva je za svaki slučaj trošenja, tj. vrstu čestica trošenja i kut pod kojim one erodiraju lijev, jedinstveno i kao takvo se mora ispitivati.

5. ZAKLJUČAK

Izotermički poboljšani nodularni lijev ima sve rašireniju primjenu u svijetu i zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava i niske cijene pokazuje se pogodnijim za primjenu u industriji od klasičnih čelika. Zato što je izotermički poboljšani nodularni lijev relativno nova vrsta materijala koja ima sve veću primjenu nastoji se o njemu saznati što je moguće više. U ovom radu opisano je ispitivanje otpornosti izotermički poboljšanog nodularnog lijeva na erozijsko trošenje različitim abrazivima pod različitim kutovima.

Abrazivi korišteni u ovim ispitivanjima su kvarcni pijesak te dvije vrste čelične sačme promjera 700 μm i 1100 μm . Kutovi pod kojim je abraziv erodirao površinu ispitnih uzoraka bili su: 15°, 30°, 45°, 60°, 75° i 90°.

Ispitivanja su pokazala da izotermički poboljšani nodularni lijev ima najbolju otpornost na erodiranje čeličnom sačmom promjera 700 μm pri kutu udara od 60°. Najlošija otpornost erozijskom trošenju izotermički poboljšanog nodularnog lijeva je ona od kvarcnog pijeska pod kutom od 75°.

Izotermički poboljšani nodularni lijev je najslabije otporan na erozijsko trošenje pijeskom, tj. oštrim abrazivnim česticama za kutove udara od 75° i 45°, otpornost trošenju okruglim česticama, tj. sačmom je najslabija za kut udara od 90°. Otpornost na erozijsko trošenje izotermički poboljšanog nodularnog lijeva okruglim česticama je otprilike duplo bolja od one oštrim česticama što upućuje na zaključak da je dominantan mehanizam trošenja mikrorezanje, odnosno mikrobrazdanje.

Može se zaključiti da djelove od izotermički poboljšanog nodularnog lijeva se ne bi smjelo izlagati trošenju oštrim erozijskim česticama pogotovo ako su kutovi udara od 45° do 75° pa čak i 90°, dok je za slučaj da su erozijske čestice okrugle otpornost bolja svakako treba izbjegavati da iste udaraju pod kuto od 90°.

6. POPIS LITERATURE

- [1] <http://www.encotech.com/docs/SolidParticleErosionandMechanicalDamage.pdf>
- [2] V. Ivušić, Tribologija, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb 2002.
- [3] <http://servers.ec-lyon.fr/tribologie>
- [4] I. Finnie, „Erosion of surfaces by solid particles“, Wear 3(1960), 87-103
- [5] J.G.A. Bitter, „A study of erosion phenomena“ I-II, Wear 6(1963), 169-190
- [6] H. Uetz, J. Föhl, „Einfluß der Korngröße auf das Strahlverschleißverhalten von Metallen und nichtmetallischen Hartstoffen“, Wear 20(1972), 299-308
- [7] R.E. Winter, I.M. Hutchings, „Solid particle erosion studies using single angular particles“, Wear 29(1979), 181-184
- [8] K.H. Zum Gahr, „Wear by hard particles“, Tribology Int., 31(10)1998, 587-596
- [9] I. Finnie, D.H. McFadden, „On the velocity dependence of the erosion of ductile metals by solid particles at low angles of incidence“, Wear 48(1978), 181-190
- [10] I.V. Kragelsky, A.I. Zolotar, A.O. Sheiwekhman, „Theory of material wear by solid particle impact – a review“, Tribology Int. 18(1985), 3-11
- [11] K.H. Zum Gahr, „Microstructure and Wear of materials“ Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York 1987.
- [12] A. Elkholy, „Prediction of abrasion wear for slurry pump materials“, Wear 84(1983), 39-49
- [13] L.P. McCabe, G.A. Sargent, H. Conrad, „Effect of microstructure on the erosion of steel by solid particles“, Wear 105(1985), 257-277
- [14] G. Sundararajan and Manish Roy: Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures, Tribology International Vol. 30; No. 5, pp. 339-359, 1997
- [15] www.rsmetali.hr/nodularni_ljev.htm
- [16] I. Finnie, 3rd National Congress of Applied Mechanics, American Society of Mechanical Engineers, 1958, 527-532
- [17] I. Finnie, Symposium on Erosion and Cavitation, ASTM STP 307, American Society for Testing and Materials, 1962, 70-82

- [18] I. Finnie, Some observations on the erosion of ductile metals, *Wear* 19(1972), 81-90
- [19] G.L. Sheldon, A. Kanhere, An investigation of impingement erosion using single particles, *Wear* 21(1972), 195-209
- [20] I. Finnie, Erosion of surfaces by solid particles, *Wear* 3(1960), 87-103
- [21] F. Unkić, F. Cajner, M. Krivohlavek, Istraživanje svojstava konvencionalnog i izotermički poboljšanog žilavog lijeva, *METALURGIJA* 33(1994) 1, 35-42
- [22] T. Kitsudo, T. Momono, X. Yaer, K. Shimizu, H. Matsumoto: Erosive wear characteristics of spheroidal carbides cast iron, *Wear*, 2007
- [23] D. Aquaro, E. Fontani: Erosion of Ductile and Brittle Materials, *Meccanica* 36: 651–661, 2001
- [24] M. Novosel, D. Krumes, Željezni materijali : (metalografske osnove i tehnička primjena željeznih ljevova), Zagreb 1997.
- [25] R.C. Voigt, „Austempered ductile iron – processing and properties“, *Cast Metals* 2(1989)2, 71-93
- [26] J. Race, L. Scott, „Practical experience in the austempering of ductile iron“, *Heat treatment of metals* 1994.4, 105-109
- [27] M. Johansson, „Austenitic-bainitic ductile iron“, *AFS Transactions* 85(1977), 117-122
- [28] M.A. Zacccone, D.E. Bowman, „Applications of austempered ductile iron in the heavy equipment industry“, *Zbornik radova 1st International Conference on Austempered Ductile Iron, Chicago, Illinois 1984.*, 227-252
- [29] M.O. Speidel, „Bruchzähigkeit und Ermüdungs-Risswachstum von Gusseisen“, *Werkstofftechnik* 12(1981), 387-402
- [30] J. Janowak, R. Gundlach, „Approaching austempered ductile iron properties by controlled cooling in the foundry“, *Zbornik radova 1st International Conference on Austempered Ductile Iron, Chicago, Illinois 1984.*, 63-69
- [31] R. Harding, „Prospects for the exploitation of austempered ductile irons“, *Zbornik radova 2nd International Conference on Austempered Ductile Iron, Michigan 1986.*, 39-54
- [32] W. Mannes, K. Hornug, H. Retting, „Erprobung von Zahnrädern aus unlegiertem bainitischen Gußeisen mit Kugelgraphit“, *Konstruieren+Geißen* 10(1985)4, 19-29

- [33] R. Gundalch, J- Janowak, „Process overviw/wear and abrasion testing“, Zbornik radova 2nd International Conference on Austempered Ductile Iron, Michigan 1986., 23-30
- [34] J.M. Motz, E. Kress, „Bainitisch-austenitsches Gußeisen mit Kugelgraphit – hochfest und verschleißbeständig“, Konstruieren+Geißen 10(1985)2, 4-11
- [35] B. Liščić, I. Katavić, „Izotermički poboljšani žilavi lijev i njegova primjena za visoko opterećene elemente“, Ljevarstvo 32(1985)3, 51-68
- [36] http://www.vorax.hr/dokumenti/mjer_tvr_hr.html
- [37] I. Kladarić, V. Ivušić, „Otpornost na umor površine poboljšanog nodularnog lijeva“, MATRIB 99, 119-127